



anses

Valeurs toxicologiques  
de référence

---

# **Carbone suie des particules de l'air ambiant extérieur**

Avis complété de l'Anses  
Rapport d'expertise collective

Septembre 2024

Connaître, évaluer, protéger



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 25 septembre 2024

## **AVIS complété<sup>1</sup>** **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire** **de l'alimentation, de l'environnement et du travail**

**relatif à l'élaboration de VTR par voie respiratoire pour les particules de l'air ambiant extérieur (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) et le carbone suie de l'air ambiant extérieur**

---

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.  
L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.  
Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.  
Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).  
Ses avis sont publiés sur son site internet.*

---

L'Anses s'est autosaisie le 9 novembre 2019 afin de fixer des VTR pour les particules et le carbone suie de l'air ambiant extérieur.

### **1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE**

#### **1.1. Contexte**

Les études quantitatives des risques sanitaires liés à l'air ambiant permettent d'estimer les impacts et d'informer la population des risques potentiels sur la santé dans le cadre, par exemple, des études d'impact des infrastructures routières Anses (2012) ou des études d'impact pour des installations classées pour la protection de l'environnement. Pour réaliser de telles évaluations des risques, il est indispensable de prendre en compte les particules en suspension et donc de disposer de valeurs sanitaires de référence, telle que des valeurs toxicologiques de référence (VTR).

---

<sup>1</sup> Annule et remplace l'avis du 12 janvier 2023. Pour le suivi des modifications, cf. annexe 1 du présent avis

Aucune VTR portant stricto sensu sur les particules de l'air ambiant n'a été identifiée. Les VTR disponibles à ce jour concernent uniquement certaines substances chimiques telles que des métaux de transition (nickel, zinc, cuivre, etc.) qui entrent dans la composition des particules de l'air ambiant (Anses 2020; INERIS 2020). Il ne s'agit pas de VTR spécifiques à ces métaux en tant que composé des particules de l'air ambiant. Il n'existe pas non plus de VTR concernant la fraction carbonée des particules de l'air ambiant. La seule VTR identifiée s'en rapprochant est une VTR à seuil élaborée par l'US EPA en 2003 pour l'inhalation d'émissions d'échappement Diesel, comprenant gaz et particules (US EPA 2003).

En l'absence de VTR, la méthode disponible et employée jusqu'à présent était de comparer les données de concentration dans l'air ambiant à des valeurs de référence sanitaire comme celles établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) ou à des valeurs réglementaires. Ces valeurs apportent des points de repères mais ne sont pas des VTR et ne permettent pas d'estimer quantitativement les risques sanitaires associés à une exposition donnée. En effet, les valeurs réglementaires peuvent intégrer des considérations économiques ou techniques par exemple. D'un point de vue strictement sanitaire, les études épidémiologiques, nombreuses dans ce domaine, montrent qu'il existe des effets sanitaires néfastes liés à des concentrations atmosphériques inférieures à ces valeurs réglementaires.

D'après une enquête par questionnaire en ligne menée en 2018 par l'Anses auprès d'un échantillon non représentatif d'utilisateurs de VTR sur le territoire national, une majorité de répondants (61,5 %) rapportait le besoin d'une VTR pour les particules de l'air ambiant dans des contextes variés.

Par ailleurs, le besoin de valeurs de référence pour d'autres indicateurs particuliers, comme le carbone suie et les particules ultrafines, a été exprimé par les évaluateurs de risque et par d'autres acteurs impliqués dans l'interprétation des données de pollution de l'air. En effet, leurs effets sanitaires sont documentés mais il n'existe pas de valeurs sanitaires (comme celles de l'OMS) ou réglementaires sur ces polluants. En 2018, l'Anses catégorisait le « carbone suie »<sup>2</sup>, un composant de la fraction carbonée des particules de l'air ambiant, et les particules ultrafines comme « polluant prioritaire [...] en vue d'une surveillance » et recommandait l'élaboration d'une VTR. Cette recommandation était confirmée en 2019 par une évaluation du poids des preuves épidémiologiques et toxicologiques observant des niveaux de preuves élevés pour les effets néfastes sur la santé de composés des particules de l'air ambiant dont les particules ultrafines, le carbone suie et le carbone organique.

## 1.2. Objet de la saisine

Au vu des éléments précédents, dans le cadre du programme de travail de la mission d'expertise sur les VTR de l'Anses, et sur avis favorables en 2018 des comités d'experts spécialisés « Valeurs Sanitaires de Référence » (CES VSR) et « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES AIR), l'Anses s'est autosaisie afin de fixer des VTR pour les particules de l'air ambiant. Plus particulièrement, il s'agissait de déterminer la faisabilité de construction des VTR par voie respiratoire pour les PM<sub>2,5</sub>, les PM<sub>10</sub>, le « carbone suie » et les particules ultrafines et, le cas échéant, construire ces VTR.

---

<sup>2</sup> Le terme « carbone suie » regroupe différentes métriques de la fraction carbonée des particules de l'air ambiant : carbone suie, carbone élémentaire et absorbance. Plus de détails sont fournis plus loin dans l'avis.

Dans un premier avis publié en janvier 2023, l'Anses déterminait une VTR long terme sans seuil par voie respiratoire pour les PM<sub>2,5</sub>, également applicable aux concentrations d'exposition aux PM<sub>10</sub> après leur conversion en concentration d'exposition aux PM<sub>2,5</sub>. Dans ce même avis, l'agence concluait à la faisabilité de construire des VTR pour le « carbone suie » à partir de données épidémiologiques. Cet avis portait également sur la faisabilité de construire des VTR pour les particules ultrafines à partir de données épidémiologiques et concluait que cette construction n'était pas faisable à date. L'étude de faisabilité sur les particules ultrafines est à présent disponible dans un rapport disponible en ligne (Anses 2024c).

Le présent avis intègre et rend compte des résultats et conclusions faisant l'objet de rapports distincts relatifs à :

- l'élaboration des VTR court terme et long terme par voie respiratoire pour les particules en masse (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) (Anses 2024a),
- l'élaboration des VTR court terme et long terme par voie respiratoire pour le « carbone suie » (Anses 2024b).

## 2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du CES VSR. L'Anses a confié l'expertise au groupe de travail (GT) « VTR PM » à partir de novembre 2019. Les travaux ont été présentés au CES VSR, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques, entre juillet 2018 (phase préparatoire) et mai 2024. Les travaux ont été présentés pour information au CES Air, entre juin 2018 (phase préparatoire) et décembre 2023. Pour les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>, les travaux ont été adoptés par le CES VSR réuni le 16 décembre 2021 concernant les VTR long terme, et le 17 mai 2024 concernant les VTR court terme. Pour le « carbone suie », les travaux ont été adoptés par le CES VSR réuni le 15 décembre 2023 concernant les VTR court terme et long terme.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. La saisine n°2019-SA-0198 fait apparaître un lien d'intérêt présentant un risque de conflit pour deux experts du CES VSR. De ce fait, ces experts n'ont pas participé à l'examen des travaux découlant de la saisine concernée. Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

La méthode mise en œuvre repose tout d'abord sur l'examen des rapports institutionnels disponibles pour documenter des informations générales sur les particules de l'air ambiant (définition, sources et niveaux d'exposition, normes et valeurs guides existantes pour la qualité de l'air ambiant). Afin d'élaborer ces VTR, les aspects cinétiques des particules inhalées ont été décrits suivis d'une synthèse des effets sur la santé des particules fines et du « carbone suie » de l'air ambiant, sur la base des rapports institutionnels (Anses 2019; HEI 2022; OMS 2013a, 2017; Santé Publique France 2019; Thurston *et al.* 2020; Thurston *et al.* 2017; US EPA 2003, 2019).

La méthode de construction de ces VTR a été adaptée de la démarche décrite dans le guide d'élaboration de l'Anses (Anses 2017) dont la révision est en cours de finalisation (Anses à paraître). Elle se fonde sur l'utilisation d'études épidémiologiques et vise à déterminer un ensemble de valeurs candidates à la VTR pour différents événements de santé, parmi lesquelles la VTR recommandée est sélectionnée.

Les principaux résultats issus de ces travaux sont résumés dans les chapitres suivants de l'avis :

- Généralités sur les particules de l'air ambiant (chapitre 3.1)
- Synthèse des effets sanitaires des particules de l'air ambiant (chapitre 3.2)
- Méthode de construction des VTR pour les  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  et « carbone suie » de l'air ambiant (chapitre 3.3)
- Construction de la VTR court terme pour les  $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$  de l'air ambiant (chapitre 3.4)
- Construction de la VTR long terme pour les  $PM_{2,5}$  de l'air ambiant (chapitre 3.5)
- Construction de la VTR court terme pour le « carbone suie » (chapitre 3.6)
- Construction de la VTR long terme pour le « carbone suie » (chapitre 3.7)
- Conclusions (chapitre 3.8)

### 3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES ET DU GT

#### 3.1. Généralités sur les particules de l'air ambiant

##### 3.1.1. Particules $PM_{2,5}$ et $PM_{10}$

Dans le domaine environnemental, les conventions métrologiques actuelles concernent la mesure de la matière particulaire en suspension dans l'air, les « PM » (*particulate matter* en anglais), en concentration massique pour les fractions de PM de diamètre aérodynamique médian inférieur ou égal à 10  $\mu m$  ( $PM_{10}$ ) et à 2,5  $\mu m$  ( $PM_{2,5}$ ). Ces fractions sont utilisées dans le domaine de la surveillance réglementaire des concentrations particulaires dans l'air ambiant définie par la directive européenne 2008/50/CE du 21 mai 2008, en cours de révision. La méthode de référence pour l'échantillonnage et l'analyse des concentrations en  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  est basée sur la méthode de collection par filtration avec analyse par gravimétrie. Les mesures peuvent aussi être réalisées à l'aide d'un analyseur automatique par systèmes de mesurage continu automatisés (AMS) dont l'équivalence est validée, tels que ceux s'appuyant sur l'utilisation de microbalances oscillantes, de l'atténuation du rayonnement bêta, ou sur des méthodes optiques *in situ*.

Les  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  proviennent d'une multitude de sources d'émission et de processus de transformation physico-chimiques dans l'atmosphère (Anses 2019). Les émissions résultent de phénomènes naturels (sable de désert, sels marins, éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.) et d'activités humaines (industries, transports, agriculture, chauffage, etc.). Les particules secondaires sont formées dans l'atmosphère à partir des gaz précurseurs tels que le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote et nitrates, les composés organiques volatils et l'ammoniac. Les  $PM_{10}$  et  $PM_{2,5}$  incluent divers composés organiques et inorganiques tels que du carbone suie, du carbone organique, des métaux, des minéraux, des endotoxines et des pollens.

### 3.1.2. Carbone suie

La fraction carbonée des particules de l'air ambiant ne représente pas une composition chimique précise mais constitue des mélanges complexes de différents composés, ayant différentes propriétés optiques et physiques. La fraction carbonée est divisée en fonction de sa capacité d'absorption de la lumière ou de son caractère plus ou moins réfractaire (US EPA 2012). Les termes utilisés pour identifier les différentes fractions d'aérosols carbonés sont dérivés des méthodes de mesure utilisées.

Le carbone suie (*black carbon*, BC) est le composé des PM qui absorbe le plus fortement la lumière. Il est défini comme le composé carboné des PM qui absorbe toutes les longueurs d'onde du rayonnement solaire. Il est produit par une combustion incomplète. Le carbone élémentaire (*elemental carbon*, EC), qui est le composé principal du BC en masse, est quant à lui le constituant le plus réfractaire de la fraction carbonée des PM. Il s'agit de la forme solide et la plus pure du carbone contenu dans les PM de l'air ambiant caractérisée par son absence de volatilité et son inertie chimique. Le EC correspondrait à une structure très proche de celle de la fraction BC. Le carbone organique (*organic carbon*, OC) est un mélange complexe de composés contenant des liaisons carbone avec d'autres éléments tels que l'hydrogène ou l'oxygène. Il peut être produit par de la combustion incomplète ou formé par l'oxydation de composés organiques volatils dans l'atmosphère. La suie (*soot* en anglais), un complexe de BC principalement et de OC, est un polluant primaire absorbant la lumière et émis par la combustion incomplète de combustibles fossiles, de biocarburants, et de biomasse. Les fumées noires (*black smoke*, BS) se réfèrent à la plus ancienne méthode standardisée pour mesurer la suie, datant de la fin des années 60. Le terme absorbance (Abs), dérivé du coefficient d'absorption de la mesure optique, est quant à lui utilisé dans plusieurs études plus récentes et se réfère au même type de technique de mesure que celle des fumées noires avec généralement un diamètre de coupure à 2,5 µm.

Plusieurs études ont montré une forte corrélation entre les métriques BC, EC et Abs (Olstrup, Johansson et Forsberg 2016; Petzold *et al.* 2013; US EPA 2012). Néanmoins, les relations quantitatives reliant les métriques peuvent varier considérablement dans le temps et l'espace. Sur le long terme, la corrélation entre BC et EC est variable et dépend de nombreux facteurs mais l'un n'en reste pas moins un bon indicateur de l'autre et *vice versa*. Des facteurs de conversion existent et peuvent être utilisés pour faciliter les comparaisons des risques sanitaires obtenus dans des études épidémiologiques utilisant différentes métriques. Sur le court terme, une telle conversion n'est *a priori* pas recommandée en raison de l'importance de l'influence des contextes temporels locaux (épisodes de pollution et saisons) dans les variations des concentrations journalières, de leurs compositions et de leurs corrélations.

Sauf mention spécifique, le terme « carbone suie » est utilisé dans le reste du document comme un terme générique désignant l'ensemble des métriques d'intérêt pour la construction de la VTR : le carbone suie (BC), le carbone élémentaire (EC) et le coefficient d'absorption ou absorbance (Abs) – tous trois usuellement utilisés dans la littérature épidémiologique<sup>3</sup>.

Les sources de « carbone suie » dans l'air ambiant sont liées au processus de combustion incomplète des combustibles fossiles ou de la biomasse : les moteurs diesel, la combustion de bois résidentiel et de charbon, les centrales utilisant du pétrole lourd ou centrales à charbon, le brûlage des résidus de l'agriculture et les feux de forêt (Anses 2019). Par conséquent, le

---

<sup>3</sup> Les fumées noires (BS) ne sont pas une métrique d'intérêt en raison de l'ancienneté des données et de l'obsolescence de la méthode de mesure datant de la fin des années 1960.

« carbone suie » est un traceur universel d'un mélange variable de particules provenant d'une grande variété de sources de combustion. Les émissions primaires de « carbone suie » sont l'un des principaux contributeurs à la formation d'aérosols organiques secondaires (une composante importante des  $PM_{2,5}$ ). Lorsqu'il est mesuré dans l'atmosphère, le « carbone suie » est toujours associé à d'autres substances issues de la combustion de combustibles carbonés, tels que des composés organiques (Janssen *et al.* 2012).

### **3.2. Synthèse des effets sanitaires des particules de l'air ambiant**

#### **3.2.1. Cinétique des particules inhalées**

L'inhalation, la pénétration, le dépôt, la translocation, la clairance et la rétention des particules dans les voies aériennes supérieures et inférieures sont influencés par les caractéristiques des particules telles que la taille et l'hygroscopie, et par certaines caractéristiques des individus exposés telles que le sexe, l'âge et l'état de santé. Au sein de l'espèce humaine, ces aspects cinétiques sont variables. Entre espèces, les différences peuvent être majeures.

L'extrapolation quantitative à l'humain des résultats observés dans les études d'expérimentation chez l'animal sur des aérosols reste complexe et incertaine compte tenu des différences physiologiques et anatomiques entre les rongeurs et les primates, bien que ces différences puissent être partiellement comblées par des modèles dosimétriques. Ces derniers restent cependant encore peu appliqués à l'étude des particules de l'air ambiant et n'intègrent pas les aspects toxicodynamiques.

Le « carbone suie » étant un composant des particules inhalées, les aspects cinétiques relatifs au dépôt, à la translocation, à la clairance et à la rétention du « carbone suie » sont *a priori* similaires à ceux des particules.

#### **3.2.2. Effets sur la santé**

Les effets des particules sur la santé sont reconnus depuis de nombreuses années. Par rapport à la fraction  $PM_{10}$ , la littérature s'est développée plus récemment sur la fraction fine  $PM_{2,5}$ , incluse dans cette fraction  $PM_{10}$ . La littérature est croissante concernant les effets des composés des particules, en particulier le « carbone suie ».

Les conclusions de plusieurs rapports institutionnels pour les effets sanitaires des  $PM_{2,5}$  et du « carbone suie », s'appuyant sur les données épidémiologiques et expérimentales, sont synthétisés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Synthèse des conclusions de rapports institutionnels sur les effets sur la santé de l'exposition aux particules fines (PM<sub>2,5</sub>) et au « carbone suie » (incluant les métriques BC, EC et Abs)

Exposition	Conclusions sur l'effet sanitaire de l'exposition aux particules fines (PM <sub>2,5</sub> )					Conclusions sur l'effet sanitaire de l'exposition au « carbone suie » (BC, EC ou Abs) pour la catégorie d'effet				Exemples d'indicateurs de santé recensés
	OMS (2013a)	Thurston <i>et al.</i> (2020); (Thurston <i>et al.</i> 2017)	OMS (2017)	Santé Publique France (2019)*	US EPA (2019)	OMS (2013a)	Anses (2019)	US EPA (2019)	HEI (2022)	
<b>Santé respiratoire</b>										
Court terme	Associations positives	Preuves convaincantes	ND	Causalité établie, groupe A	Relation causale probable	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Associations positives	ND	Mortalité toutes causes respiratoires, hospitalisations pour causes respiratoires spécifiques (asthme, BPCO), exacerbations de l'asthme
Long terme	Associations positives	Preuves convaincantes	Causalité établie	Causalité établie, groupe B	Relation causale probable	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Associations positives	Confiance faible chez les <u>enfants</u>	Mortalité toutes causes respiratoires et de causes spécifiques, incidence de l'asthme de l'enfant, incidence de la BPCO, trouble du développement de la fonction pulmonaire et déclin de la fonction pulmonaire
<b>Santé cardiovasculaire</b>										
Court terme	Relation causale	Associations positives	ND	Causalité établie, groupe A	Relation causale avérée	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Associations positives	ND	Hospitalisations et mortalité de causes cardiovasculaires (toutes causes ou causes spécifiques, telle que cardiopathie ischémique), augmentation de la pression artérielle
Long terme	Relation causale	Associations positives	Causalité établie	Causalité établie, groupe B	Relation causale avérée	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Données limitées et discordantes	Confiance faible à modérée	Mortalité toutes causes cardiovasculaires, incidence d'AVC et de maladies coronariennes (incluant infarctus), évolution de l'épaisseur de l'intima-média carotidienne
<b>Mortalité toutes causes</b>										
Court terme	Associations cohérentes et robustes	ND	ND	Causalité établie, groupe A	Relation causale avérée	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Associations positives	ND	Mortalité toutes causes non accidentelles
Long terme	Associations cohérentes et robustes	ND	Causalité établie	Causalité établie, groupe A	Relation causale avérée	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Associations positives	Confiance forte	Mortalité toutes causes non accidentelles, réduction de l'espérance de vie
<b>Hospitalisations toutes causes</b>										
Court terme	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Indication « forte » d'effets	ND	ND	Hospitalisations toutes causes non accidentelles

**Avis de l'Anses**  
Saisine n° « 2019-SA-0198 »

Exposition	Conclusions sur l'effet sanitaire de l'exposition aux particules fines (PM <sub>2,5</sub> )					Conclusions sur l'effet sanitaire de l'exposition au « carbone suie » (BC, EC ou Abs) pour la catégorie d'effet				Exemples d'indicateurs de santé recensés
	OMS (2013a)	Thurston et al. (2020); (Thurston et al. 2017)	OMS (2017)	Santé Publique France (2019)*	US EPA (2019)	OMS (2013a)	Anses (2019)	US EPA (2019)	HEI (2022)	
<b>Santé neurologique</b>										
Court terme	ND	ND	ND	ND	Relation causale suggérée	ND	Aucune publication identifiée	Associations positives chez l'enfant	ND	États dépressifs et anxieux, déficits (transitoires) des fonctions cognitives ou neurocomportementales, marqueurs de l'inflammation cérébrale
Long terme	Preuves émergentes, effet suggéré	Associations positives, preuves émergentes	ND	Causalité établie, groupe B	Relation causale probable	ND	Indication « modérée » d'effets	Associations positives chez l'enfant	Associations positives rapportées	Incidence de la maladie de Parkinson, dégradation des fonctions cognitives et accélération du déclin cognitif, altération du neurodéveloppement chez les enfants,
<b>Santé périnatale</b>										
Long terme	Preuves croissantes	Preuves émergentes	ND	Causalité établie, groupe A	Relation causale suggérée	ND	Indication « modérée » d'effets	Associations positives	Confiance très faible à modérée	Petit poids de naissance, prématurité, fertilité
<b>Cancer</b>										
Long terme	ND	Risque accru†	Causalité établie†	Causalité établie, groupe A	Relation causale probable†	ND	Indication « inadéquate » d'effets	Niveau de preuve insuffisant	Confiance faible	Mortalité par cancer du poumon, incidence et prévalence du cancer du poumon
<b>Troubles du métabolisme</b>										
Court terme	ND	Preuves émergentes, insuffisamment solides	ND	ND	Relation causale suggérée	ND	Aucune publication identifiée	Aucune publication identifiée	ND	Marqueurs de la tolérance au glucose, de la sensibilité à l'insuline et du contrôle du diabète
Long terme	Preuves émergentes, effet suggéré	Preuves émergentes, insuffisamment solides	ND	Causalité établie, groupe B	Relation causale suggérée	ND	Indication « inadéquate » d'effets	Aucune publication identifiée	Confiance faible	Mortalité cardiométabolique, incidence et prévalence du diabète et du syndrome métabolique, développement de l'obésité chez les enfants, marqueurs de l'homéostasie du glucose

Abs : absorbance ; Anses : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (France) ; BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire ; HEI : Health Effects Institute (Etats-Unis) ; ND : non disponible ; OMS : Organisation Mondiale de la Santé ; US EPA : United States Environmental Protection Agency (Agence de protection de l'environnement des États-Unis). \*Groupe A : le niveau d'incertitude sur la transposabilité du risque est faible et suffisamment de données permettent une quantification fiable. Groupe B : il y a des incertitudes sur la transposabilité du risque et la disponibilité des données pour quantifier les effets n'est pas forcément garantie. † Conclusions basées sur le cancer du poumon.

### 3.3. Méthode de construction des VTR court terme et long terme pour les PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> et « carbone suie » de l'air ambiant

La méthode de construction des VTR pour les particules de l'air ambiant s'appuie sur la démarche de construction des VTR communément appliquée pour des substances chimiques individuelles, décrite dans le guide de l'Anses (à paraître). Pour caractériser l'excès d'incidence de (ou l'excès de mortalité par) cancers en fonction de l'exposition à une substance chimique (ex : trichloréthylène) ou à des radionucléides (ex : radon), ce type de méthode a déjà été appliqué (Goldbohm *et al.* 2006; NRC 1988; US EPA 2002). Des adaptations ont été appliquées dans le cas des particules de l'air ambiant en raison de la nature ubiquitaire de l'exposition. **La méthode décrite ci-dessous, comprenant 5 étapes de construction et représentée dans la Figure 1, a été appliquée séparément pour les PM<sub>2,5</sub>, les PM<sub>10</sub> et le « carbone suie » des particules de l'air ambiant ainsi que pour chaque durée d'exposition (court terme et long terme).**

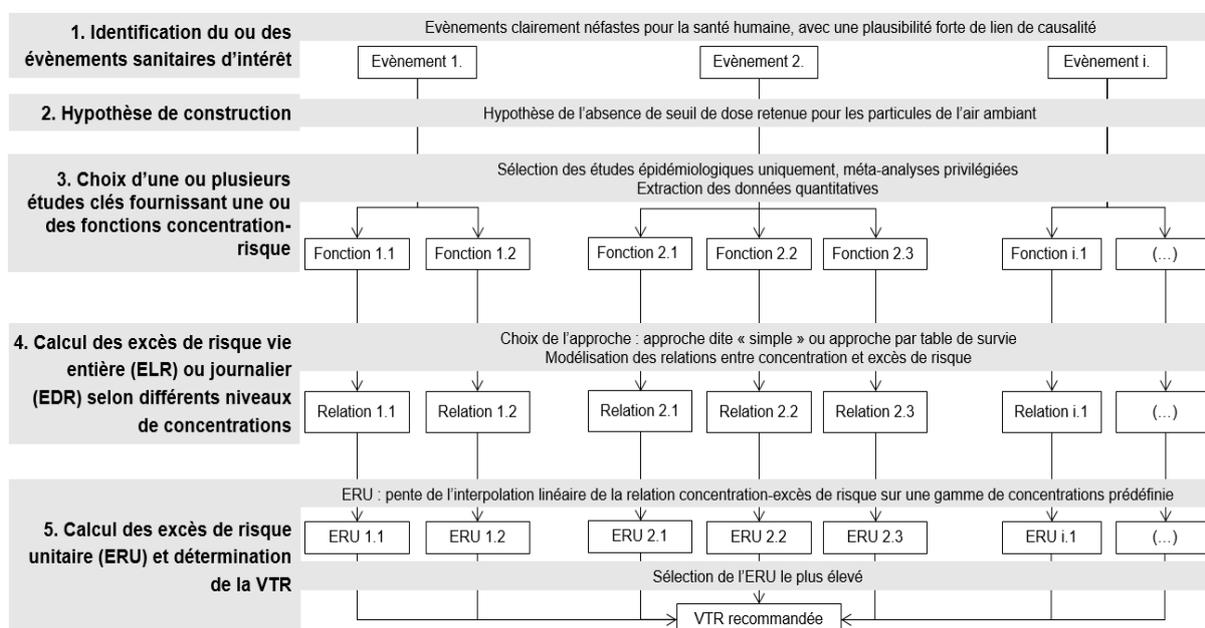


Figure 1. Démarche de construction des VTR par voie inhalée pour les particules en masse (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) et pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

#### 3.3.1. Identification des événements sanitaires d'intérêt

Les événements néfastes pour la santé, candidats à l'élaboration des VTR, sont identifiés à partir des événements de santé recensés dans les rapports institutionnels évoqués précédemment et doivent répondre aux deux critères suivants : i) événements correspondant à un événement clinique néfaste observé chez l'Homme, ii) événements pour lesquels les niveaux de plausibilité d'un lien de causalité avec l'exposition sont qualifiés de fort ou modéré par le GT.

Un événement clinique néfaste pour la santé est défini comme l'ensemble des événements considérés dans la pyramide des effets sanitaires associés à la pollution de l'air par l'OMS (OMS 2005), tels que des décès anticipés ou des pathologies cardio-respiratoires. Les événements infracliniques, tels que des variations de paramètres ou fonctions biologiques (par exemple, biomarqueurs de développement de l'athérosclérose ou développement de la fonction pulmonaire chez l'enfant) n'ont pas été considérés pour la construction des VTR. En effet, bien que les études examinant ces événements infracliniques soient essentielles à

l'établissement d'une plausibilité biologique, elles sont difficilement exploitables dans la prédiction quantitative de risques pour la santé humaine compte tenu du caractère plus ou moins pronostique de l'évènement considéré et du manque de données de distributions de ces paramètres ou fonctions en population générale.

Le niveau de plausibilité d'un lien de causalité a été qualifié par les experts du GT en trois catégories (fort, modéré, faible) sur la base des conclusions issues des rapports institutionnels récents cités précédemment et de leur jugement d'experts.

### 3.3.2. Hypothèse de construction

L'hypothèse d'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé a été retenue pour la construction de ces VTR court terme et long terme.

En effet, les études observationnelles en population générale examinant l'exposition aux PM montrent des effets sur la santé même aux plus faibles concentrations rencontrées aux États-Unis, en Europe et au Canada que ce soit pour des niveaux de concentration annuels ou journaliers. Cette tendance sans seuil a été expliquée par l'existence d'une large distribution des seuils individuels (pouvant être expliquée par des facteurs génétiques, par d'autres facteurs de risque environnementaux et par des états pathologiques et comportementaux) et qui, au niveau populationnel, est lissée sans seuil discernable (Schwartz, Laden et Zanobetti 2002). Ces fondements du modèle de construction de relations dose-réponse sans seuil de concentration sont par ailleurs décrits dans le cadre conceptuel de l'évaluation des risques par le *National Research Council* (NRC) de l'Académie des Sciences américaines (NRC 2009), au sein duquel les particules de l'air ambiant sont prises en exemple. De plus, des fonctions concentration-risque ne considérant pas de seuil de concentration sont d'ores et déjà utilisées dans la construction de différents outils d'aide à la décision relatifs à la pollution atmosphérique, tels que dans les études quantitatives d'impact sanitaire (HEI 2020; OMS 2020; Santé Publique France 2019) ou les valeurs guides ou normes de qualité de l'air ambiant (OMS 2021; US EPA 2021). Enfin, le « carbone suie » étant un des composants majeurs des particules de l'air ambiant, les éléments conceptuels soutenant l'hypothèse de construction sans seuil sont *a priori* valables pour ce composant. Des études épidémiologiques récentes, bien que moins nombreuses que pour les PM, montrent que les effets sur la santé du « carbone suie » persistent à de faibles niveaux de concentration, sans seuil discernable.

### 3.3.3. Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque<sup>4</sup>

Les références identifiées lors d'une recherche bibliographique au sein de Pubmed® et Scopus® ont été sélectionnées sur la base de critères d'éligibilité et d'inclusion définis par le GT. Seules les études épidémiologiques ont été considérées en raison i) de la littérature épidémiologique existante fournissant des estimations quantitatives de risques sanitaires en population générale sur des évènements de santé d'intérêt, et ii) des limites de la transposabilité animal-humain.

---

<sup>4</sup> Le terme « fonction concentration-risque » est préféré à celui de « relation dose-réponse » dans les présents travaux en raison de l'exploitation d'un corpus d'études épidémiologiques. En effet, les études épidémiologiques mettent généralement en relation des concentrations de polluants dans l'air ambiant avec une estimation de risque pour la santé. Il peut s'agir d'un risque relatif (RR), d'un odd ratio (OR) ou d'un *hazard ratio* (HR) pour un incrément ou un intervalle interquartile de concentration ; la fonction reliant ce risque à la concentration est alors supposée log-linéaire. Il peut aussi s'agir d'un modèle mathématique caractérisant la forme de la fonction concentration-risque, éventuellement non linéaire (par exemple, modèles SCHIF - *Shape constrained Health Impact Function* - ou fonctions *splines*).

Les fonctions concentration-risque disponibles dans les études épidémiologiques sélectionnées ont été extraites. Les données quantitatives d'intérêt correspondent aux indicateurs de risque rapportés dans les publications, permettant de quantifier la relation entre l'exposition et un évènement de santé parmi ceux sélectionnés précédemment. Les fonctions examinant l'exposition à long terme au « carbone suie » ont été converties pour être exprimées en « équivalent-absorbance », permettant ainsi les comparaisons entre fonctions initialement dérivées avec des métriques différentes (BC, EC ou Abs).

A chaque fonction concentration-risque extraite a été attribué un niveau d'intérêt pour construire une VTR (fort, modéré ou faible) sur la base i) de l'examen du texte intégral et de la qualité de la publication et ii) de critères d'évaluations définis *a priori* par le GT décrivant la nature, la robustesse, la puissance et la validité externe de la fonction. Les études ou méta-analyses examinant plusieurs localisations géographiques en France ou dans plusieurs pays, incluant des pays européens, ont été préférées aux études n'incluant qu'une seule localisation car elles sont considérées plus robustes et plus représentatives de la population française. Les fonctions concentration-risque sélectionnées pour la suite de la démarche sont celles qui présentent des niveaux d'intérêt *a minima* modéré pour la construction d'une VTR. Plusieurs fonctions peuvent être sélectionnées pour un même évènement de santé.

### 3.3.4. Calcul des excès de risque selon différents niveaux de concentrations

#### ■ Définitions

L'excès de risque vie entière (ELR, *Excess Lifetime Risk*) correspond à la probabilité sur la vie entière d'occurrence d'un évènement sanitaire due à une exposition pendant toute la vie d'un individu, qui vient s'ajouter à la probabilité d'occurrence de l'évènement non liée à cette exposition - appelée par la suite « risque de fond ». Cet ELR est utilisé pour dériver la VTR long terme.

L'excès de risque journalier (EDR, *excess daily risk*) correspond à la probabilité supplémentaire d'occurrence d'un évènement sanitaire due à une exposition d'intérêt le jour même et/ou les quelques jours précédant cette occurrence, qui vient s'ajouter à la probabilité d'occurrence de l'évènement non liée à cette exposition. Cet EDR est utilisé pour dériver la VTR court terme.

#### ■ Approches

Deux approches décrites pour la construction de VTR sans seuil dans le guide d'élaboration de l'Anses (à paraître) sont utilisées pour dériver les excès de risque (ELR ou EDR) en fonction de différents niveaux d'exposition : l'approche dite simple et l'approche par table de survie<sup>5</sup>. Elles peuvent toutes deux s'utiliser avec les fonctions concentration-risque rapportées dans les études épidémiologiques mais n'utilisent pas le même type de données de risque de fond – la table de survie nécessitant la disponibilité de données par classe d'âge pour l'évènement de santé considéré. Une adaptation permettant de calculer les excès de risque (ELR ou EDR) avec l'effet de l'exposition d'intérêt retiré dans le risque de fond a été considérée afin de prendre en compte l'absence de population non exposée aux particules de l'air ambiant extérieur ; cette adaptation est appelée « décrémentation ».

L'approche par table de survie décrémentation a été privilégiée par le GT quand les données nécessaires étaient disponibles car elle fournit des résultats plus précis prenant en compte l'existence de risques compétitifs ainsi que l'éventuelle variation du risque au cours de la vie.

---

<sup>5</sup> Pour l'ELR uniquement.

Quand l'approche par table de survie i) n'était pas possible en raison de l'indisponibilité des données sur le risque de fond par classe d'âge, ou ii) était non requise en raison de la tranche d'âge relativement jeune de survenue de l'évènement de santé (par exemple, petit poids de naissance) ou iii) était non requise en raison de la durée d'exposition relativement courte (quelques jours), le GT a appliqué l'approche dite simple décroissante.

Compte tenu de l'exploitation d'études épidémiologiques en population générale, aucun ajustement temporel ou allométrique n'est requis à cette étape. De plus, s'agissant d'études épidémiologiques considérant des expositions aux concentrations atmosphériques ambiantes, aucune extrapolation de la relation concentration-risque à des concentrations plus faibles n'a été réalisée.

### 3.3.5. Calcul des excès de risque unitaire et détermination de la VTR

Les valeurs candidates à la VTR sont dérivées pour chaque évènement de santé et correspondent à l'excès de risque unitaire (ERU i.e. l'excès de risque par unité de concentration d'exposition), égal à la pente de l'interpolation linéaire de la courbe représentant l'ELR (long terme) ou l'EDR (court terme) sur une gamme de concentrations prédéfinie. Cette dernière correspond aux concentrations habituellement observées en France métropolitaine et incluant les valeurs maximales des concentrations observées en bordures d'infrastructures routières. Dans les cas où la forme de la relation observée entre la concentration et l'ELR ou l'EDR est décrite par différentes interpolations linéaires en fonction de différentes gammes de concentrations souvent observables en France, la VTR est logiquement constituée de plusieurs ERU différents en fonction des différentes gammes de concentration considérées. Chacun des ERU est égal à la pente de l'interpolation linéaire de la courbe sur la gamme de concentration, additionné de la constante (intercept) à partir de la deuxième gamme de concentration. Pour calculer l'ERU, aucune extrapolation de la relation entre l'ELR ou l'EDR et la concentration n'a été réalisée en dehors de la gamme prédéfinie. En effet, cette dernière est représentative de l'exposition de la population d'intérêt (France) et est généralement incluse dans les gammes de concentrations considérées par les études épidémiologiques clés.

Pour chaque évènement de santé et durée d'exposition, la valeur de l'ERU la plus protectrice pour la santé a été retenue comme valeur candidate, à niveau d'intérêt le plus fort et à qualité jugée équivalente. Les valeurs candidates (ERU) sont accompagnées de la fonction paramétrique reliant l'ELR (long terme) ou l'EDR (court terme) à la concentration<sup>6</sup>. Un score de confiance a été attribué à ces valeurs candidates allant de 1 à 5 et correspondant aux niveaux de confiance suivants : faible (= 1), moyen (= 2 ou 3) ou fort (= 4 ou 5) (guide d'élaboration de l'Anses à paraître).

Les VTR recommandées seront égales aux valeurs candidates (ERU) les plus protectrices pour la santé et pour lesquelles :

- le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé et
- le score de confiance est parmi les plus élevés.

---

<sup>6</sup> Cette fonction paramétrique permet de représenter la forme de la relation sans recourir à l'interpolation linéaire, ce qui est particulièrement pertinent en cas de non linéarité du risque.

### 3.4. Construction de la VTR court terme pour les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> de l'air ambiant

Ce paragraphe présente de manière synthétique le processus de détermination de la VTR court terme par voie respiratoire pour l'exposition aux PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> de l'air ambiant. Les résultats pour les hospitalisations de causes cardiaques (tous âges), qui est l'évènement de santé retenu *in fine* pour dériver la VTR, y sont détaillés. Les résultats pour les autres évènements de santé, représentant l'ensemble des autres valeurs candidates à la VTR, sont détaillés dans le rapport d'expertise collective sur les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> (Anses 2024a).

#### 3.4.1. Identification des évènements sanitaires d'intérêt

Parmi les évènements de santé identifiés sur la base des conclusions des rapports institutionnels, le GT a retenu ceux présentant une pertinence clinique et une plausibilité du lien de causalité qualifiée de forte ou *a minima* modérée :

- la mortalité toutes causes non accidentelles ;
- pour la santé respiratoire : la mortalité toutes causes respiratoires, la mortalité par BPCO<sup>7</sup>, les hospitalisations toutes causes respiratoires et les hospitalisations ou passages dans les services d'urgence de causes respiratoires spécifiques (asthme, BPCO, infections respiratoires) ;
- pour la santé cardiovasculaire : la mortalité toutes causes cardiovasculaires, la mortalité de causes cardiovasculaires spécifiques (pathologie cardiaque, pathologie cardiaque ischémique, infarctus du myocarde, AVC<sup>8</sup>), les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires et les hospitalisations ou passages dans les services d'urgence de causes cardiovasculaires spécifiques (pathologie cardiaque, pathologie cardiaque ischémique, infarctus du myocarde, insuffisance cardiaque, dysrythmie cardiaque, AVC).

#### 3.4.2. Hypothèse de construction

L'hypothèse d'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé a été retenue pour les PM<sub>2,5</sub> et les PM<sub>10</sub> (cf chapitre 3.3.2).

#### 3.4.3. PM<sub>2,5</sub> / Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque

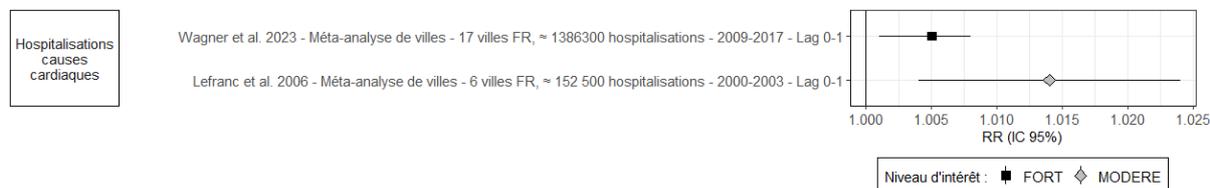
Au total, 343 publications ont été identifiées suite aux recherches bibliographiques. Après sélection selon des critères et modalités définis *a priori* par le GT, 29 publications ont été incluses, examinant l'exposition à court terme aux PM<sub>2,5</sub> ou aux PM<sub>10</sub> en lien avec l'un des évènements de santé sélectionnés à l'étape précédente.

Pour les PM<sub>2,5</sub>, les hospitalisations pour causes cardiaques (tous âges) étaient examinées dans deux publications (Lefranc *et al.* 2006; Wagner *et al.* 2023). Les deux publications portent sur une méta-analyse regroupant les risques estimés sur 6 villes françaises sur 3-4 années (Lefranc *et al.* 2006) et sur une méta-analyse plus récente des risques estimés sur 17 villes françaises sur 9 années (Wagner *et al.* 2023).

<sup>7</sup> Bronchopneumopathie chronique obstructive.

<sup>8</sup> Accident vasculaire cérébral.

Les fonctions concentration-risque pour les PM<sub>2,5</sub> et les hospitalisations pour causes cardiaques (tous âges) sont visibles dans la Figure 2. La fonction concentration-risque avec un niveau d'intérêt « fort » pour dériver une VTR a été retenue pour la suite de la démarche.

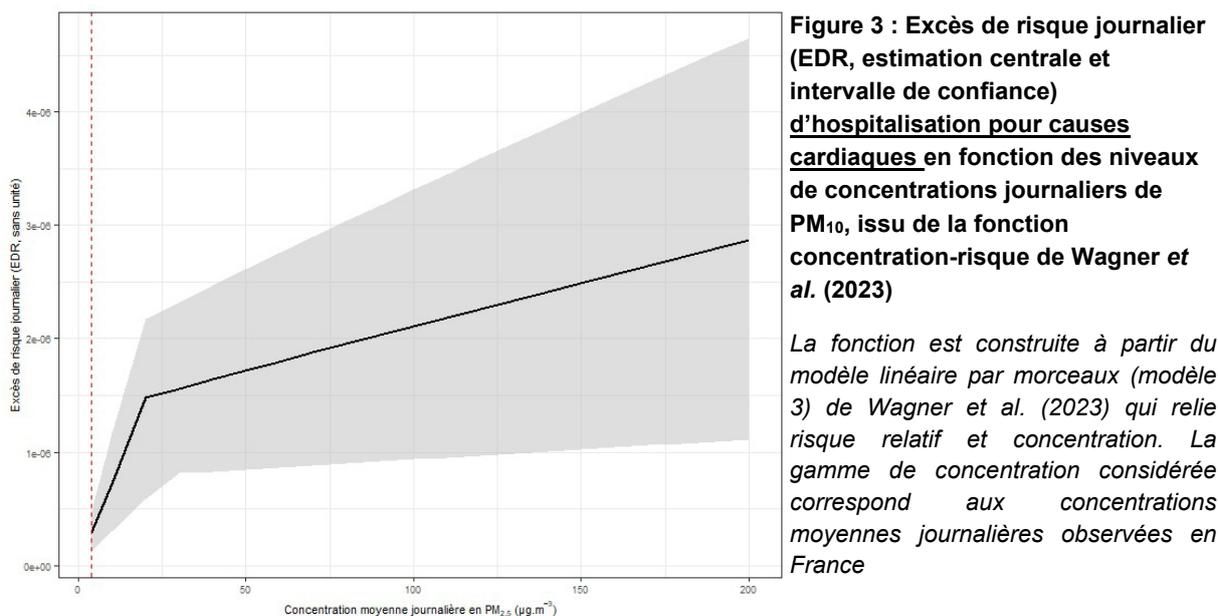


Une standardisation pour un même incrément de concentration ( $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Lag : nombre de jours de décalage entre l'exposition et l'évènement de santé. ND : non disponible.

**Figure 2. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'hospitalisations pour causes cardiaques (tous âges) pour une augmentation de  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme aux PM<sub>2,5</sub>**

### 3.4.4. PM<sub>2,5</sub> / Calcul des excès de risque

L'approche dite « simple » avec une application décroissante a été utilisée pour calculer les EDR pour les hospitalisations de causes cardiaques (tous âges) (Figure 3).



**Figure 3 : Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'hospitalisation pour causes cardiaques en fonction des niveaux de concentrations journalières de PM<sub>10</sub>, issu de la fonction concentration-risque de Wagner et al. (2023)**

La fonction est construite à partir du modèle linéaire par morceaux (modèle 3) de Wagner et al. (2023) qui relie risque relatif et concentration. La gamme de concentration considérée correspond aux concentrations moyennes journalières observées en France

L'EDR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Wagner *et al.* (2023) présente le niveau d'intérêt le plus élevé et est donc retenue par le GT. Cette fonction est dérivée d'une étude sur plusieurs villes en France métropolitaine et présente de nombreux avantages pour dériver une VTR, en comparaison de celle issue de Lefranc *et al.* (2006), principalement car elle repose sur : 1) une période d'étude plus récente, 2) un nombre plus important de villes (et *de facto* un RR plus précis et plus transposable à une autre population) et 3) une étude de la forme de la relation concentration-risque en plus du modèle linéaire (linéaire par morceaux, spline cubique). De plus, l'étude de Wagner *et al.* (2023) est évaluée de bonne qualité par le GT compte tenu des faibles risques de biais.

### 3.4.5. PM<sub>2,5</sub> / Détermination des valeurs candidates et de la VTR

L'ensemble des valeurs candidates à la VTR court terme pour les PM<sub>2,5</sub> sont présentées en Annexe 2.

La VTR court terme retenue pour les PM<sub>2,5</sub> est associée au risque d'hospitalisation de cause cardiaque. La VTR correspond à deux ERU différents en fonction de deux gammes de concentration en PM<sub>2,5</sub><sup>9</sup> :

- un ERU de  $1,65 \cdot 10^{-7} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$  pour des concentrations moyennes journalières [PM<sub>2,5</sub>] inférieures ou égales à  $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
- et un ERU de  $7,69 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1} + 1,56 \cdot 10^{-6}$  pour des concentrations moyennes journalières [PM<sub>2,5</sub>] supérieures à  $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Il s'agit des ERU les plus protecteurs pour la santé parmi toutes les valeurs candidates, pour lequel le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé (« fort ») et le score de confiance est parmi les plus élevés (4,8 sur 5).

### 3.4.6. PM<sub>10</sub> / Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque

Au total, 343 publications ont été identifiées suite aux recherches bibliographiques. Après sélection selon des critères et modalités définis *a priori* par le GT, 29 publications ont été incluses, examinant l'exposition à court terme aux PM<sub>2,5</sub> ou aux PM<sub>10</sub> en lien avec l'un des événements de santé sélectionnés à l'étape précédente.

Pour les PM<sub>10</sub>, les hospitalisations pour causes cardiaques (tous âges) étaient examinées dans trois publications (Janssen *et al.* 2011; Larrieu *et al.* 2007; Wagner *et al.* 2023). La première est une méta-analyse regroupant 2 publications (Janssen *et al.* 2011). Les deux dernières sont une méta-analyse regroupant les risques estimés sur 8 villes françaises sur 3-5 années (Larrieu *et al.* 2007) et une méta-analyse plus récente des risques estimés sur 17 villes françaises sur 9 années (Wagner *et al.* 2023).

Les fonctions concentration-risque pour les PM<sub>10</sub> et les hospitalisations pour causes cardiaques (tous âges) sont visibles dans la Figure 4. La fonction concentration-risque avec un niveau d'intérêt « fort » pour dériver une VTR a été retenue pour la suite de la démarche.



Une standardisation pour un même incrément de concentration ( $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Lag : nombre de jours de décalage entre l'exposition et l'évènement de santé. ND : non disponible.

**Figure 4. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'hospitalisations pour causes cardiaques (tous âges) pour une augmentation de  $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme aux PM<sub>10</sub>**

<sup>9</sup> Deux ERU différents en fonction de deux gammes de concentration [PM<sub>2,5</sub>] ont été retenus compte tenu de la forme de la relation observée entre la concentration [PM<sub>2,5</sub>] et l'excès de risque journalier EDR, et compte tenu du fait que des concentrations moyennes journalières sont souvent observables en France dans chacune de ces deux gammes de concentration. Ainsi, pour une concentration [PM<sub>2,5</sub>] inférieure ou égale à  $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{EDR} = 1,65 \cdot 10^{-7} \times [\text{PM}_{2,5}]$  et pour une concentration [PM<sub>2,5</sub>] supérieure à  $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{EDR} = 7,69 \cdot 10^{-9} \times [\text{PM}_{2,5}] + 1,56 \cdot 10^{-6}$ .

### 3.4.7. PM<sub>10</sub> / Calcul des excès de risque

L'approche dite « simple » avec une application décrémentele a été utilisée pour calculer les EDR pour les hospitalisations de causes cardiaques (tous âges) (Figure 5).

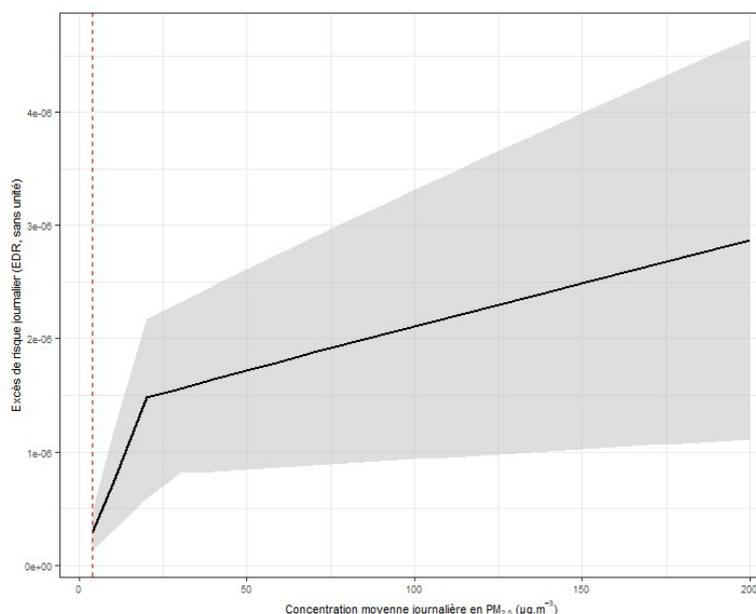


Figure 5 : Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'hospitalisation pour causes cardiaques en fonction des niveaux de concentrations journalières de PM<sub>10</sub>, issu de la fonction concentration-risque de Wagner et al. (2023)

La fonction est construite à partir du modèle linéaire par morceaux (modèle 3) de Wagner et al. (2023) qui relie risque relatif et concentration. La gamme de concentration considérée correspond aux concentrations moyennes journalières observées en France

L'EDR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Wagner *et al.* (2023) présente le niveau d'intérêt le plus élevé et est donc retenue par le GT. Cette fonction est dérivée d'une étude sur plusieurs villes en France métropolitaine et présente de nombreux avantages pour dériver une VTR, en comparaison de celle issue de Larrieu *et al.* (2007), principalement car elle repose sur : 1) une période d'étude plus récente, 2) un nombre plus important de villes (et *de facto* un RR plus précis et plus transposable à une autre population) et 3) une étude de la forme de la relation concentration-risque en plus du modèle linéaire (linéaire par morceaux, spline cubique). De plus, l'étude de Wagner *et al.* (2023) est évaluée de bonne qualité par le GT compte tenu des faibles risques de biais.

### 3.4.8. PM<sub>10</sub> / Détermination des valeurs candidates et de la VTR

L'ensemble des valeurs candidates à la VTR court terme pour les PM<sub>10</sub> sont présentées en Annexe 3.

La VTR court terme retenue pour les PM<sub>10</sub> est associée au risque d'hospitalisation de cause cardiaque. La VTR correspond à deux ERU différents en fonction de deux gammes de concentration en PM<sub>10</sub><sup>10</sup> :

- un ERU de  $7,34 \cdot 10^{-8} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$  pour des concentrations moyennes journalières [PM<sub>10</sub>] inférieures ou égales à  $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

<sup>10</sup> Deux ERU différents en fonction de la gamme de concentration [PM<sub>10</sub>] ont été retenus compte tenu de la forme de la relation observée entre la concentration [PM<sub>10</sub>] et l'excès de risque journalier EDR, et compte tenu du fait que des concentrations moyennes journalières sont souvent observables en France dans chacune de ces deux gammes de concentration. Ainsi, pour une concentration [PM<sub>10</sub>] inférieure ou égale à  $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{EDR} = 7,34 \cdot 10^{-8} \times [\text{PM}_{10}]$  et pour une concentration [PM<sub>10</sub>] supérieure à  $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{EDR} = 7,71 \cdot 10^{-9} \times [\text{PM}_{10}] + 1,33 \cdot 10^{-6}$ .

- et un ERU de  $7,71.10^{-9} (\mu\text{g.m}^{-3})^{-1} + 1,33.10^{-6}$  pour des concentrations moyennes journalières  $[\text{PM}_{10}]$  supérieures à  $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ .

Il s'agit des ERU les plus protecteurs pour la santé parmi toutes les valeurs candidates, pour lequel le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé (« fort ») et le score de confiance est parmi les plus élevés (4,8 sur 5).

### 3.5. Construction de la VTR long terme pour les $\text{PM}_{2,5}$ de l'air ambiant

Ce paragraphe présente de manière synthétique le processus de détermination de la VTR long terme par voie respiratoire pour l'exposition aux  $\text{PM}_{2,5}$  de l'air ambiant. Les résultats pour la mortalité toutes causes non accidentelles, qui est l'évènement de santé retenu *in fine* pour dériver la VTR, y sont détaillés. Les résultats pour les autres évènements de santé, représentant l'ensemble des autres valeurs candidates à la VTR, sont détaillés dans le rapport d'expertise collective.

#### 3.5.1. Identification des évènements sanitaires d'intérêt

Parmi les évènements de santé identifiés sur la base des conclusions des rapports institutionnels, le GT a retenu ceux présentant une pertinence clinique et une plausibilité du lien de causalité qualifiée de forte ou *a minima* modérée :

- la mortalité toutes causes non accidentelles et la réduction de l'espérance de vie ;
- pour la santé respiratoire : la mortalité de causes respiratoires (toutes causes et causes spécifiques : BPCO<sup>11</sup>, infections des voies respiratoires inférieures) et l'incidence de maladies chroniques (asthme chez l'enfant et chez l'adulte, BPCO) ;
- pour la santé cardiovasculaire : la mortalité de causes cardiovasculaires (toutes causes et causes spécifiques : AVC<sup>12</sup> et cardiopathie ischémique), l'incidence d'évènements ou maladies cardiovasculaires (AVC, cardiopathie ischémique, évènements coronariens, infarctus) et l'hypertension artérielle ;
- pour les cancers : l'incidence du cancer du poumon, la mortalité par cancer du poumon ;
- pour la santé périnatale : le petit poids de naissance, la prématurité et la pré-éclampsie.

#### 3.5.2. Hypothèse de construction

L'hypothèse d'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé pour les  $\text{PM}_{2,5}$  a été retenue (cf chapitre 3.3.2).

#### 3.5.3. Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque

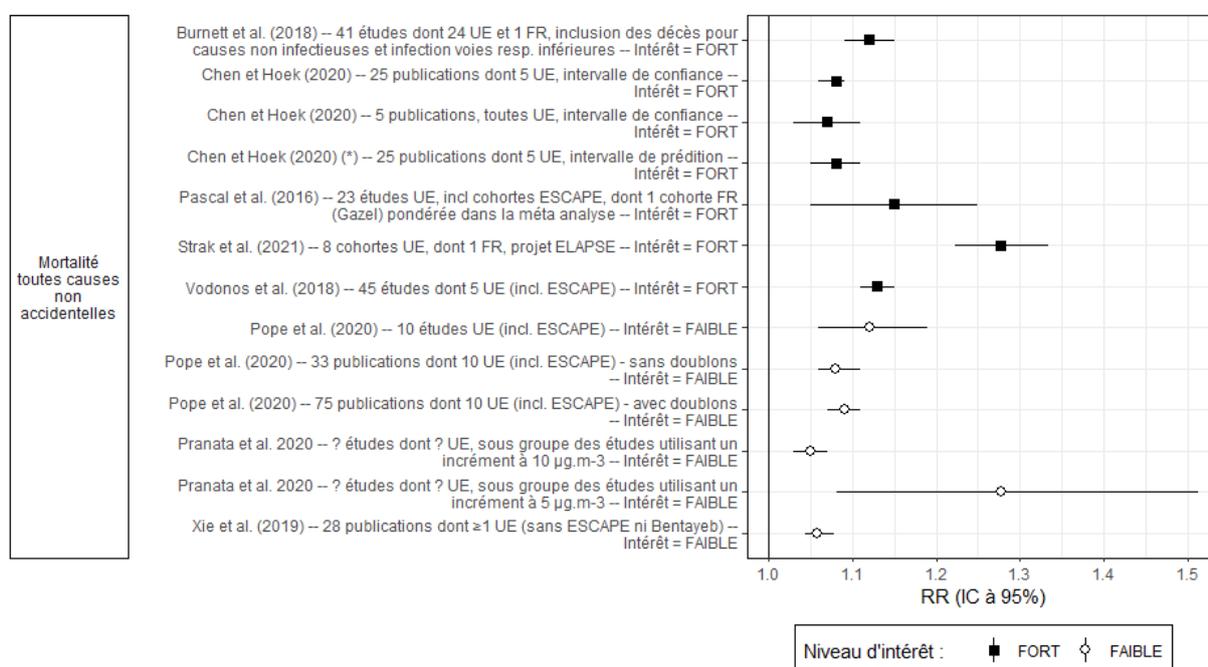
Au total, 730 publications ont été identifiées pour les  $\text{PM}_{2,5}$ , suite aux recherches bibliographiques. Après sélection selon des critères et modalités définis *a priori* par le GT, 41 publications ont été incluses.

<sup>11</sup> Bronchopneumopathie chronique obstructive.

<sup>12</sup> Accident vasculaire cérébral.

La mortalité toutes causes non accidentelles était examinée dans 8 publications en lien avec une exposition à long terme aux PM<sub>2,5</sub> (Burnett *et al.* 2018; Chen et Hoek 2020; Pascal *et al.* 2016; Pope *et al.* 2020; Pranata *et al.* 2020; Strak *et al.* 2021; Vodonos, Awad et Schwartz 2018; Xie *et al.* 2019). Ce sont toutes des méta-analyses de publications incluant des études européennes et faisant suite à une revue de la littérature, sauf Strak *et al.* (2021) qui est une analyse poolée de 8 cohortes européennes réalisée dans le cadre du projet européen ELAPSE<sup>13</sup>.

Les fonctions concentration-risque pour la mortalité toutes causes non accidentelles (exprimées en risques relatifs pour une augmentation de 10 µg.m<sup>-3</sup>) sont visibles dans la Figure 6. Trois publications ont également caractérisé la forme (non linéaire) de la relation concentration-risque (Burnett *et al.* 2018; Strak *et al.* 2021; Vodonos, Awad et Schwartz 2018). Les 6<sup>14</sup> fonctions concentration-risque avec un intérêt « fort » pour dériver une VTR sont retenues pour la suite de la démarche.



Les RR présentés ont été standardisés pour un même incrément (10 µg.m<sup>-3</sup>) de l'exposition à long terme aux PM<sub>2,5</sub>, permettant ainsi les comparaisons. (\*) Estimation centrale du RR présentée avec son intervalle de prédiction (à distinguer de l'estimation centrale avec intervalle de confiance).

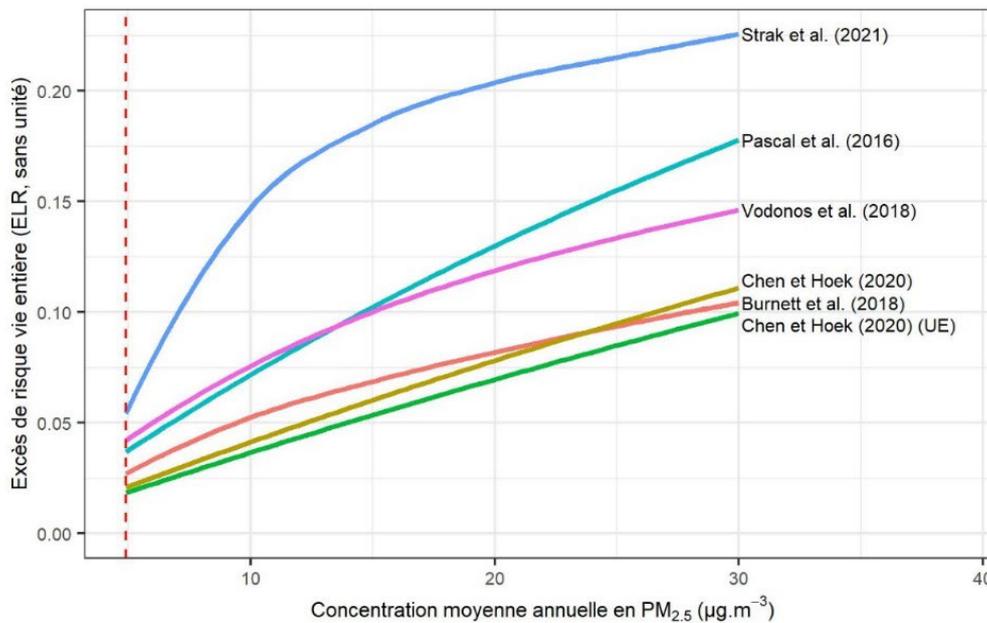
Figure 6. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de mortalité toutes causes non accidentelles pour une augmentation de 10 µg.m<sup>-3</sup> de l'exposition à long terme aux PM<sub>2,5</sub>

### 3.5.4. Calcul des excès de risque

Compte tenu de la disponibilité des données sur le risque de fond par classe d'âge pour les décès toutes causes, l'approche par table de survie a été utilisée pour calculer les ELR associés aux fonctions concentration-risque de cet évènement de santé (Figure 7).

<sup>13</sup> *Effects of Low-level Air Pollution: a Study in Europe.*

<sup>14</sup> Sept fonctions concentration-risque avec un intérêt « fort » sont présentées. La fonction de Chen et Hoek (2020) incluant 25 publications est représentée deux fois, la première avec son intervalle de confiance et la seconde avec son intervalle de prédiction (l'estimation centrale est identique). L'analyse avec intervalle de prédiction a été privilégiée à celle avec intervalle de confiance.



Trois fonctions intègrent la forme non-linéaire de la relation (Burnett et al. 2018; Strak et al. 2021; Vodonos, Awad et Schwartz 2018). Les autres supposent une relation log-linéaire. Burnett et al. (2018) intègrent également l'évolution de la relation en fonction de l'âge. La gamme de concentration considérée correspond aux concentrations moyennes annuelles observées en France (Pascal et al. 2016).

**Figure 7. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) de décès toutes causes non accidentelles en fonction des niveaux de concentrations annuels de PM<sub>2,5</sub>**

L'ELR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Strak et al. (2021) est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentrations considérée. La forme (non linéaire) de la relation entre exposition aux PM<sub>2,5</sub> et risque de décès toutes causes non accidentelles y est en outre incluse, avec un intérêt spécifique des auteurs pour les faibles concentrations ambiantes. L'analyse de Strak et al. (2021) présente l'avantage de ne considérer que des cohortes européennes, améliorant la transposabilité de la fonction concentration-risque à la population française qui est celle d'intérêt dans les présents travaux. Cette analyse est considérée de bonne qualité par les experts du GT grâce à la standardisation des données individuelles entre cohortes, les degrés d'ajustement sur les facteurs de confusion et la modélisation sophistiquée de l'exposition (résolution spatiale et temporelle fine et bonnes performances).

Ainsi, compte tenu de ces éléments, l'ELR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Strak et al. (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité toutes causes non accidentelles.

### 3.5.5. Détermination des valeurs candidates et de la VTR

L'ensemble des valeurs candidates à la VTR long terme pour les PM<sub>2,5</sub> sont présentées en Annexe 4.

La VTR retenue pour les particules de l'air ambiant est l'ERU de décès toutes causes non accidentelles de  $1,28.10^{-2} (\mu\text{g.m}^{-3})^{-1}$  et la fonction paramétrique associée  $\text{ELR} = 2,19.10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 1,51.10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 3,61.10^{-2} \times [\text{PM}_{2,5}] - 8,83.10^{-2}$ . Il s'agit de l'ERU le plus protecteur pour la santé parmi toutes les valeurs candidates, pour lequel le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé (« fort ») et le score de confiance est parmi les plus élevés (4,8 sur 5). Pour la mortalité toutes causes non accidentelles, deux pentes

d'interpolation ont été construites sur les intervalles  $[4,9 - 15,0 \mu\text{g.m}^{-3}]$  et  $]15,0 - 30,0 \mu\text{g.m}^{-3}]$  de concentration en  $\text{PM}_{2,5}$  et ce, compte tenu de la forme supra-linéaire de la relation entre concentration et ELR.

### 3.6. Construction de la VTR court terme pour le « carbone suie »

Ce paragraphe présente de manière synthétique le processus de détermination de la VTR court terme par voie respiratoire pour l'exposition au « carbone suie » des particules de l'air ambiant. Les résultats pour les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires, qui est l'évènement de santé retenu *in fine* pour dériver la VTR, y sont détaillés. Les résultats pour les autres évènements de santé, représentant l'ensemble des autres valeurs candidates à la VTR, sont détaillés dans le rapport d'expertise collective sur le « carbone suie » (Anses 2024b).

#### 3.6.1. Identification des évènements sanitaires d'intérêt

Parmi les évènements de santé identifiés sur la base des conclusions des rapports institutionnels, le GT a retenu ceux présentant une pertinence clinique et une plausibilité du lien de causalité qualifiée de forte ou *a minima* modérée :

- la mortalité toutes causes non accidentelles et les hospitalisations toutes causes non accidentelles ;
- pour la santé respiratoire : la mortalité toutes causes respiratoires, les hospitalisations toutes causes respiratoires, les hospitalisations de causes respiratoires spécifiques (asthme, BPCO<sup>15</sup>, infections respiratoires), l'asthme (déclenchement de symptômes, traitement) et les sifflements ;
- pour la santé cardiovasculaire : la mortalité toutes causes cardiovasculaires, les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires et les hospitalisations de causes cardiovasculaires spécifiques (AVC<sup>16</sup>, maladie cardiaque ischémique, congestion cardiaque, infarctus et évènements coronariens).

#### 3.6.2. Hypothèse de construction

L'hypothèse d'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé a été retenue pour le « carbone suie » (cf chapitre 3.3.2).

#### 3.6.3. Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque

Au total, 999 publications ont été identifiées suite aux recherches bibliographiques. Après sélection selon des critères et modalités définis *a priori* par le GT, 30 publications ont été incluses, dont 9 examinant l'exposition à court terme au « carbone suie » en lien avec l'un des évènements de santé sélectionnés à l'étape précédente.

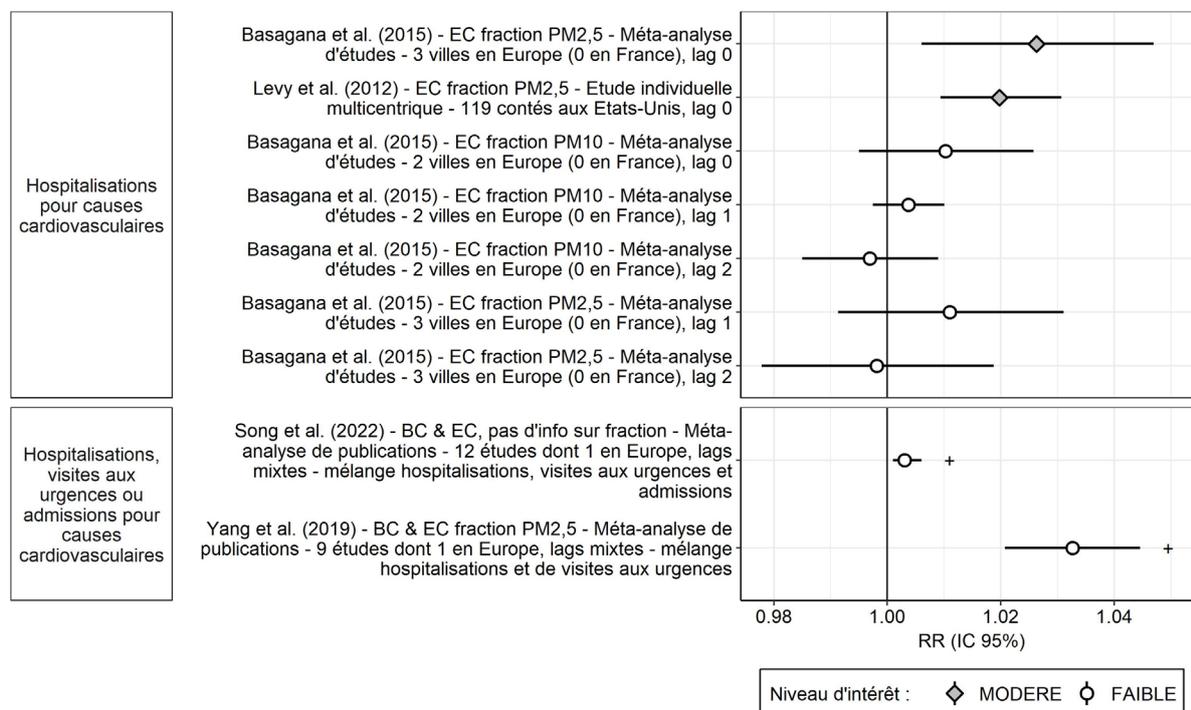
Les hospitalisations pour causes cardiovasculaires étaient examinées dans 4 publications (Basagaña *et al.* 2015; Levy *et al.* 2012; Song *et al.* 2022; Yang *et al.* 2019). Les deux premières sont des analyses multi-villes tandis que les deux dernières sont des méta-analyses regroupant 9 à 12 publications (dont Basagaña *et al.* (2015)).

---

<sup>15</sup> Bronchopneumopathie chronique obstructive.

<sup>16</sup> Accident vasculaire cérébral.

Les fonctions concentration-risque pour les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires (exprimées en risques relatifs pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de carbone élémentaire) sont visibles dans la Figure 8. Les deux fonctions concentration-risque avec un niveau d'intérêt « modéré » pour dériver une VTR ont été retenues pour la suite de la démarche.

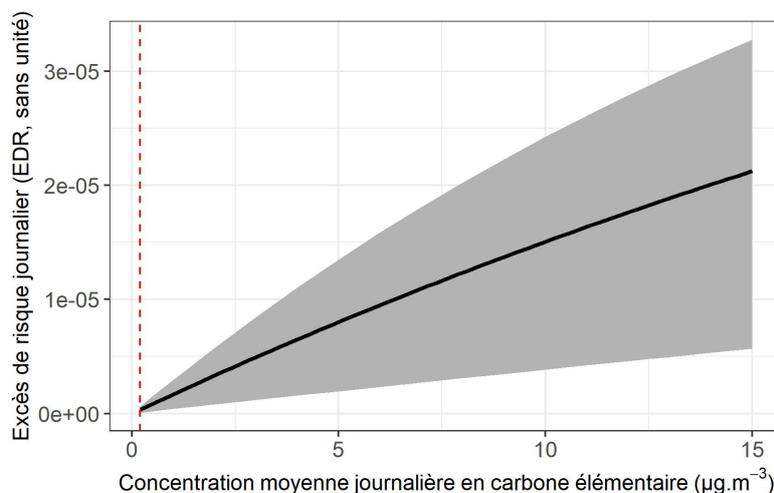


Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. + Mélange de métriques. BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 8. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie »**

### 3.6.4. Calcul des excès de risque

L'approche dite « simple » avec une application décrémente a été utilisée pour calculer les EDR pour les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires (Figure 9).



En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

**Figure 9. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Basagaña et al. (2015)**

L'EDR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) pour le carbone élémentaire dans la fraction PM<sub>2,5</sub> sur le lag 0 est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. De plus, l'étude de Basagaña *et al.* (2015) est évaluée de bonne qualité par le GT compte tenu des faibles risques de biais.

Ainsi, l'EDR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : hospitalisations pour causes cardiovasculaires.

### 3.6.5. Détermination des valeurs candidates et de la VTR

L'ensemble des valeurs candidates à la VTR court terme pour le « carbone suie » sont présentées en Annexe 5.

La VTR court terme retenue pour le « carbone suie » est l'ERU d'hospitalisation toutes causes cardiovasculaires de  $1,48.10^{-6}$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )<sup>-1</sup> applicable à une concentration d'exposition au carbone élémentaire. Il s'agit de l'ERU le plus protecteur pour la santé parmi toutes les valeurs candidates, pour lequel le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé (« modéré ») et le score de confiance est parmi les plus élevés (4,5 sur 5).

### 3.7. Construction de la VTR long terme pour le « carbone suie »

Ce paragraphe présente de manière synthétique le processus de détermination de la VTR long terme par voie respiratoire pour l'exposition au « carbone suie » des particules de l'air ambiant. Les résultats pour la mortalité toutes causes non accidentelles, qui est l'évènement de santé retenu *in fine* pour dériver cette VTR, y sont détaillés. Les résultats pour les autres évènements de santé, représentant l'ensemble des autres valeurs candidates à cette VTR, sont détaillés dans le rapport d'expertise collective sur le « carbone suie ».

#### 3.7.1. Identification des évènements sanitaires d'intérêt

Parmi les évènements de santé identifiés sur la base des conclusions des rapports institutionnels, le GT a retenu ceux présentant une pertinence clinique et une plausibilité du lien de causalité qualifiée de forte ou *a minima* modérée :

- la mortalité toutes causes non accidentelles et la réduction de l'espérance de vie ;
- pour la santé respiratoire : la mortalité de causes respiratoires (toutes causes et causes spécifiques : BPCO<sup>17</sup>), l'incidence de l'asthme chez l'enfant, l'incidence de l'asthme chez l'adulte et l'incidence de la BPCO ;
- pour la santé cardiovasculaire : la mortalité de causes cardiovasculaires (toutes causes et causes spécifiques : cérébrovasculaire, AVC<sup>18</sup>, maladies coronariennes incluant infarctus et cardiopathie ischémique), l'incidence de maladies coronariennes (incluant infarctus) et l'incidence d'AVC ;
- pour la santé périnatale : le petit poids de naissance.

<sup>17</sup> Bronchopneumopathie chronique obstructive.

<sup>18</sup> Accident vasculaire cérébral.

### 3.7.2. Hypothèse de construction

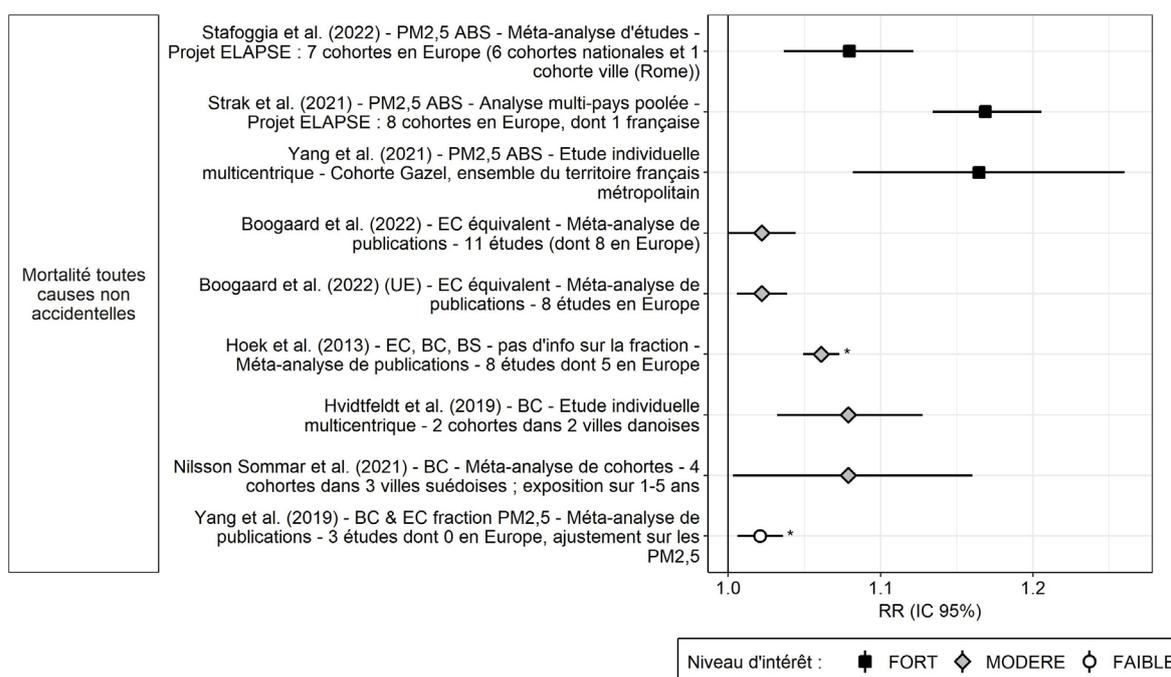
L'hypothèse d'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé a été retenue pour le « carbone suie » (cf chapitre 3.3.2).

### 3.7.3. Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque

Au total, 999 publications ont été identifiées suite aux recherches bibliographiques. Après sélection selon des critères et modalités définis *a priori* par le GT, 30 publications ont été incluses, dont 23 examinant l'exposition à long terme au « carbone suie » en lien avec l'un des événements de santé sélectionnés à l'étape précédente.

La mortalité toutes causes non accidentelles était examinée dans huit publications dont trois études multicentriques (Hvidtfeldt *et al.* 2019; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021) et cinq méta-analyses (Boogaard *et al.* 2022; Hoek *et al.* 2013; Nilsson Sommar *et al.* 2021; Stafoggia *et al.* 2022; Yang *et al.* 2019), incluant toutes des localisations européennes.

Les fonctions concentration-risque pour la mortalité toutes causes non accidentelles (exprimées en risques relatifs pour une augmentation de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  d'équivalent-absorbance) sont visibles dans la Figure 10.



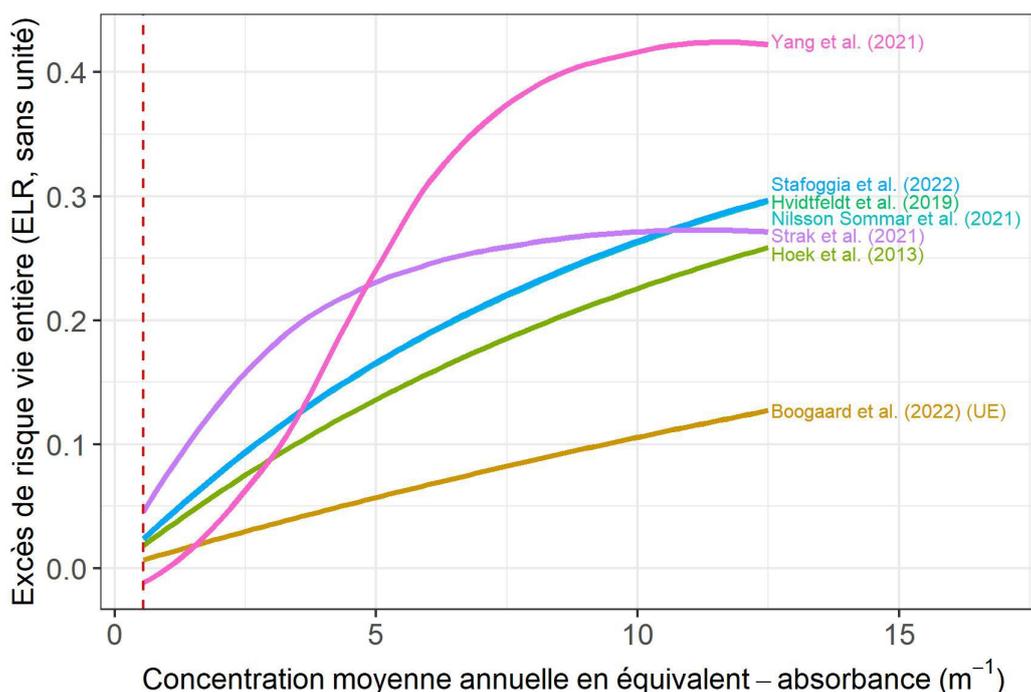
Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. \* Les risques n'ont pas pu être convertis en équivalent-abs car un mélange de métriques était utilisé par les auteurs, sans possibilité de transformation ; le risque est alors exprimé pour un incrément de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

Figure 10. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de mortalité toutes causes non accidentelles pour une augmentation de  $1.10^{-5}$  de l'exposition à long terme au « carbone suie »

Sept<sup>19</sup> fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR ont été retenues pour la suite de la démarche. Trois publications ont caractérisé la forme non linéaire de la relation concentration-risque (Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021).

### 3.7.4. Calcul des excès de risque

Compte tenu de la disponibilité de données sur le risque de fond par classe d'âge pour les décès toutes causes, l'approche par table de survie décrementale a été utilisée pour cet évènement de santé (Figure 11).



Deux fonctions intègrent la forme non-linéaire de la relation entre concentration et risque (Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021) ; les autres supposent une relation log-linéaire. Les fonctions concentration-risque ont été converties en équivalent-abs quand c'était possible ; seule la fonction de Hoek *et al.* (2013) n'a pas pu être convertie. Trois fonctions présentent les mêmes estimations centrales donc les ELR correspondants se chevauchent sur la figure (Hvidtfeldt *et al.* 2019; Nilsson Sommar *et al.* 2021; Stafoggia *et al.* 2022).

**Figure 11. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) de décès toutes causes non accidentelles en fonction des concentrations moyennes annuelle en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

L'ELR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021) est le plus protecteur pour la santé sur la première partie de la gamme de concentrations ( $\leq 5 \cdot 10^{-5} \text{m}^{-1}$ ), qui sont les plus fréquemment observées en zone urbaine en France. La forme non linéaire de la relation entre exposition au « carbone suie » et risque de décès toutes causes y est en outre incluse et ce, pour des populations exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $\leq 3 \cdot 10^{-5} \text{m}^{-1}$ ). En contrepartie, il est à noter que cela implique une extrapolation de la fonction concentration-risque à des niveaux supérieurs. De plus,

<sup>19</sup> Parmi les deux fonctions extraites de Boogaard *et al.* (2022), celle issue de l'analyse secondaire n'incluant que des localisations européennes a été privilégiée par la suite car elle est supposée plus représentative de la population cible (française) et elle présente un intervalle de confiance plus réduit autour de l'estimation centrale du risque.

l'analyse de Strak *et al.* (2021a) ne considère que des cohortes européennes, permettant une bonne transposabilité de la fonction à la population française. Enfin, cette analyse est considérée de bonne qualité par le GT en raison de la standardisation des données individuelles entre cohortes, des degrés d'ajustement sur les facteurs de confusion et de la modélisation sophistiquée de l'exposition (résolution spatiale et temporelle fine et bonnes performances).

Il est à noter que l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Yang *et al.* (2021) est le plus protecteur pour une population exposée à des concentrations annuelles plus élevées ( $\geq 5.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ). De telles valeurs sont représentatives de situations spécifiques et ponctuelles (proximité d'infrastructures routières avec un trafic important par exemple). De manière générale, de plus grandes incertitudes sont attendues autour des ELR dérivés sur des gammes de concentrations  $\geq 8.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , car ces dernières ne sont que peu représentées dans les études épidémiologiques décrivant des fonctions concentration-risque.

Ainsi, l'ELR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité toutes causes non accidentelles.

### 3.7.5. Détermination des valeurs candidates et de la VTR

L'ensemble des valeurs candidates à la VTR long terme pour le « carbone suie » sont présentées en Annexe 6.

La VTR long terme retenue pour le « carbone suie » de l'air ambiant est l'ERU de décès toutes causes non accidentelles de  $5,29.10^{-2} (.10^{-5} \text{ m}^{-1})^{-1}$  et la fonction paramétrique associée  $ELR = 2,86.10^{-4} \times [\text{abs}]^3 - 8,24.10^{-3} \times [\text{abs}]^2 + 8,00.10^{-2} \times [\text{abs}] + 4,49.10^{-3}$ . Il s'agit de l'ERU le plus protecteur pour la santé parmi toutes les valeurs candidates, pour lequel le niveau de plausibilité de causalité et le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée sont les plus élevés (« fort ») et le score de confiance est parmi les plus élevés (4,6 sur 5).

## 3.8. Conclusions

Les VTR construites pour les  $PM_{2,5}$  sont basées sur une large gamme d'aérosols présents dans l'air. Dans le cas d'une pollution particulaire ayant une composition physico-chimique spécifique (ex : aérosols de particules enrichies en métaux ou en minéraux issues de source industrielle), le CES rappelle que des VTR dédiées aux substances chimiques particulières en question doivent être utilisées quand elles existent et ce, en complément et séparément de la VTR proposée ici pour les  $PM_{2,5}$  de l'air ambiant en général.

Pour un même polluant ( $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  ou « carbone suie »), il est à noter que la VTR court terme et la VTR long terme sont à utiliser séparément et que les résultats de leur application doivent être interprétés de manière indépendante. Les effets à long terme intègrent en partie des effets à court terme et inversement.

De même, les VTR pour le « carbone suie », les  $PM_{2,5}$  et les  $PM_{10}$  sont à utiliser séparément les unes des autres. Ces dernières concernent en effet les particules en général, incluant de fait du « carbone suie » et d'autres composés. Le « carbone suie » présente l'avantage d'être un indicateur universel de particules provenant de diverses sources de combustion. Ainsi, les VTR pour le « carbone suie » peuvent être utilisées en complément des VTR pour les particules ( $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$ ), en présence d'une pollution particulaire issue d'un processus de combustion tel que le trafic routier et le chauffage au bois.

Pour rappel, le terme « carbone suie » est utilisé comme un terme générique pour désigner l'ensemble des métriques d'intérêt : le carbone suie, le carbone élémentaire et le coefficient d'absorption (absorbance). Les VTR ont été dérivées pour des concentrations en « carbone suie » exprimées en carbone élémentaire (court terme) et en absorbance (long terme), car ces métriques étaient utilisées dans les études clés et étaient les plus représentées dans les études épidémiologiques recensées. Le cas échéant, le GT et le CES rappellent qu'il existe des facteurs de conversion permettant de convertir les concentrations entre les trois métriques du « carbone suie ». Néanmoins, ces facteurs pouvant varier dans le temps et l'espace, il est recommandé d'utiliser, si disponible, un facteur de conversion propre à la méthode de mesure utilisée, à la zone géographique évaluée et à la période de temps considérée.

Enfin, des ERU et des fonctions paramétriques ont également été élaborés pour d'autres événements de santé que ceux retenus pour la construction des VTR (Annexes 2, 3, 4, 5 et 6). Ils peuvent être utilisés au même titre qu'une VTR dans le cadre d'une évaluation quantitative des risques sanitaires ciblant ces événements spécifiquement, en veillant à ne pas additionner certains événements de santé, ce qui pourrait entraîner dans certains cas un double comptage (par exemple, les décès toutes causes cardiovasculaires et décès par cardiopathie ischémique). Pour évaluer le risque sanitaire d'une exposition durant l'enfance uniquement ou d'une exposition prénatale, les ERU et fonctions paramétriques portant sur l'incidence de l'asthme chez l'enfant et sur le faible poids de naissance peuvent être utilisés.

La VTR permet de calculer un excès de risque correspondant à l'exposition à une concentration prédéfinie de  $PM_{2,5}$ , de  $PM_{10}$  ou de « carbone suie ».

### **3.8.1. VTR court terme et long terme pour les $PM_{2,5}$ et $PM_{10}$ de l'air ambiant extérieur**

Le CES recommande l'utilisation de deux VTR, court terme et long terme, par voie respiratoire pour les  $PM_{2,5}$  (Tableau 2). Pour les  $PM_{10}$ , le CES recommande l'utilisation d'une VTR court terme, et pour le long terme, la conversion en concentration de  $PM_{2,5}$  puis l'application de la VTR long terme élaborée pour les  $PM_{2,5}$ . Il s'agit des excès de risque unitaire les plus protecteurs pour lesquels le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé. Un niveau de confiance fort a été attribué à ces VTR.

Pour une concentration moyenne annuelle en  $PM_{2,5}$  supérieure à  $15 \mu g.m^{-3}$ , la VTR long terme pourrait surestimer le risque du fait de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration et risque sur cette gamme. Pour affiner le calcul sur cette gamme, l'ERU peut être remplacé par la fonction paramétrique.

La construction de VTR par voie inhalée pour des expositions à long terme aux  $PM_{10}$  n'a pas été retenue car :

- les effets sanitaires des  $PM_{2,5}$  sont globalement mieux étayés que ceux des  $PM_{10}$  dans la littérature récente,
- les risques rapportés de l'exposition à long terme aux  $PM_{10}$  pour la mortalité toutes causes, la mortalité par cardiopathie ischémique, la mortalité toutes causes respiratoires et la mortalité par cancer du poumon sont d'une amplitude moindre que ceux rapportés pour les  $PM_{2,5}$  (Chen et Hoek 2020),
- et la fraction  $PM_{2,5}$  incluse dans la fraction  $PM_{10}$  est fortement corrélée à cette dernière dans l'air ambiant, et permet l'utilisation de facteurs pertinents pour la conversion de la concentration.

Pour une concentration moyenne annuelle en PM<sub>10</sub> ([PM<sub>10</sub>]), il est recommandé de la convertir en concentration moyenne annuelle en PM<sub>2,5</sub> ([PM<sub>2,5</sub>]) avec le ratio [PM<sub>2,5</sub>] : [PM<sub>10</sub>] propre à la zone géographique évaluée ou avec tout autre modèle plus sophistiqué, puis d'utiliser la VTR long terme recommandée pour les PM<sub>2,5</sub> (Tableau 2). En France, des ratios locaux peuvent être fournis par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air.

Plus généralement, l'OMS (2021) indique qu'un ratio [PM<sub>2,5</sub>] : [PM<sub>10</sub>] compris entre 0,5 et 0,8 est valable pour la plupart des situations. En 2013, le projet HRAPIE de l'OMS recommandait l'utilisation d'un ratio [PM<sub>2,5</sub>] : [PM<sub>10</sub>] de 0,65, considéré comme une moyenne pour la population européenne, afin de convertir des fonctions concentration-risque pour les PM<sub>10</sub> en PM<sub>2,5</sub> (OMS 2013b). Ces différentes valeurs peuvent être utilisées en l'absence de données de concentration propres à la zone géographique évaluée.

Il n'existe pas à ce jour de consensus ou recommandations sur des niveaux acceptables de risque sanitaire lié à l'exposition aux particules de l'air ambiant. Les niveaux de risque acceptables traditionnellement considérés pour les substances chimiques cancérigènes sont de 10<sup>-5</sup> ou 10<sup>-6</sup>. A titre d'information, pour les rayonnements ionisants et pour le radon dans l'air, une exposition pendant 70 ans à la valeur limite réglementaire pour l'exposition du public<sup>20</sup> correspondrait à un niveau estimé de risque de cancer de l'ordre de 10<sup>-3</sup>-10<sup>-2</sup>, d'après les relations exposition-risque disponibles (Hunter *et al.* 2015; ICRP 2022) et sous l'hypothèse d'une relation linéaire sans seuil entre exposition et risque.

Pour les particules de l'air ambiant, les concentrations en PM<sub>2,5</sub> les plus faibles observées en France sont associées à un niveau de risque de l'ordre de 10<sup>-4</sup> pour le cancer du poumon, le petit poids de naissance et l'asthme, et de l'ordre de 10<sup>-3</sup> pour les décès anticipés, par rapport à une concentration de fond<sup>21</sup> de 5 µg.m<sup>-3</sup>. A titre indicatif, les niveaux des excès de risque vie entière de décès anticipé, correspondant à l'exposition à une concentration en PM<sub>2,5</sub> équivalente aux valeurs cibles intermédiaires recommandées en 2021 par l'OMS, varient de 8,6.10<sup>-2</sup> (pour la valeur OMS IT-4 de 10 µg.m<sup>-3</sup>) à 20,7.10<sup>-2</sup> (pour la valeur OMS IT-1 de 35 µg.m<sup>-3</sup>) par rapport à une concentration de fond de 5 µg.m<sup>-3</sup>.

---

<sup>20</sup> Pour les rayonnements ionisants, la limite de dose efficace pour l'exposition du public fixée à l'article 12 de la Directive 2013/59/EURATOM est de 1 mSv par an. Pour le radon dans l'air, l'article 74 de la Directive 2013/59/EURATOM fixe un niveau de référence de la concentration d'activité moyenne annuelle dans l'air à ne pas excéder de 300 Bq.m<sup>-3</sup>.

<sup>21</sup> Concentration de fond : niveau de concentration en l'absence de l'exposition d'intérêt dans l'évaluation de risque. La concentration de fond peut être déterminée par exemple à partir de l'état initial du milieu aérien (ex : avant le début d'une exploitation industrielle), à partir d'une comparaison avec un environnement local témoin, ou à partir de référentiels locaux ou nationaux indiquant des gammes de valeurs habituelles dans le milieu non dégradé.

En l'absence de données de modélisation permettant d'estimer la part de la pollution anthropique (liée à l'activité humaine) en France, le niveau de référence sans pollution anthropique retenu par Santé publique France est 5 µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>2,5</sub> (percentile 5 de la distribution des concentrations du polluant) (Santé Publique France 2021). Ce niveau est retenu ici comme concentration de fond.

Tableau 2. VTR par voie respiratoire pour les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> de l'air ambiant

Polluant	Type de VTR	Effet (étude clé)	Fonction Concentration-Excès de risque ou concentration(s) équivalente(s)	VTR
PM <sub>2,5</sub>	VTR court terme	Hospitalisations de causes cardiaques (100-I52)  Wagner <i>et al.</i> (2023) : analyse poolée de 17 villes françaises, lag 0-1	Fonction linéaire par morceaux (risque relatif)*	<p><b>Pour <math>[PM_{2,5}] \leq 10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}</math> :</b>  <math>ERU = 1,65 \cdot 10^{-7} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}</math></p> <p><b>Pour <math>[PM_{2,5}] &gt; 10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}</math> :</b>  <math>ERU = 7,69 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 1,56 \cdot 10^{-6}</math></p> <p><u>(<math>[PM_{2,5}]</math> en moyenne journalière)</u></p> <p>Niveau de confiance : Fort</p>
	VTR long terme	Décès toutes causes non accidentelles  Strak <i>et al.</i> (2021) : analyse poolée de 8 cohortes européennes réalisée dans le cadre du projet ELAPSE	Fonction non linéaire (hazard ratio)**	<p><b>ERU = <math>1,28 \cdot 10^{-2} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}</math></b></p> <p><i>Pour affiner, utiliser la fonction paramétrique ci-dessous :</i></p> <p><b>ELR = <math>2,19 \cdot 10^{-5} \times [PM_{2,5}]^3 - 1,51 \cdot 10^{-3} \times [PM_{2,5}]^2 + 3,61 \cdot 10^{-2} \times [PM_{2,5}] - 8,83 \cdot 10^{-2}</math></b></p> <p><u>(<math>[PM_{2,5}]</math> en moyenne annuelle)</u></p> <p>Niveau de confiance : Fort</p>
PM <sub>10</sub>	VTR court terme	Hospitalisations de causes cardiaques (100-I52)  Wagner <i>et al.</i> (2023) : analyse poolée de 17 villes françaises, lag 0-1	Fonction linéaire par morceaux (risque relatif)*	<p><b>Pour <math>[PM_{10}] \leq 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}</math> :</b>  <math>ERU = 7,34 \cdot 10^{-8} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}</math></p> <p><b>Pour <math>[PM_{10}] &gt; 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}</math> :</b>  <math>ERU = 7,71 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 1,33 \cdot 10^{-6}</math></p> <p><u>(<math>[PM_{10}]</math> en moyenne journalière)</u></p> <p>Niveau de confiance : Fort</p>
	VTR long terme			<p>Pas de VTR Long terme construite #</p> <p># Il est recommandé de convertir la concentration d'exposition aux PM<sub>10</sub> (<math>[PM_{10}]</math>) en concentration PM<sub>2,5</sub> (<math>[PM_{2,5}]</math>) avec le ratio <math>[PM_{2,5}] : [PM_{10}]</math> propre à la zone géographique évaluée ou avec tout autre modèle plus sophistiqué, puis d'utiliser la VTR long terme recommandée pour les PM<sub>2,5</sub></p>

ERU : excès de risque unitaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ELR : excès de risque vie entière (excess lifetime risk) ; Lag : nombre de jours de décalage entre l'exposition et l'évènement de santé ;  $[PM_{2,5}]$  : concentration atmosphérique en PM<sub>2,5</sub> ;  $[PM_{10}]$  : concentration atmosphérique en PM<sub>10</sub>. \* Fonction piecewise-linear (modèle « 3 »). \*\* Fonction SCHIF - Shape-Constrained Health Impact Functions, modèle « ensemble ». ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ELR : excès de risque vie entière (excess lifetime risk).

### 3.8.2.VTR court terme et long terme pour le « carbone suie » de l'air ambiant extérieur

Le CES recommande l'utilisation de deux VTR court terme et long terme par voie respiratoire élaborées pour le « carbone suie (Tableau 3) ; il s'agit des excès de risque unitaire les plus protecteurs pour lesquels le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé. Un niveau de confiance fort a été attribué à ces VTR.

**Tableau 3. VTR par voie respiratoire pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant**

Type de VTR	Effet (étude clé)	Fonction Concentration-Excès de risque ou concentration(s) équivalente(s)	VTR
VTR court terme	Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires  Basagaña <i>et al.</i> (2015) : méta-analyse d'études dans 3 villes en Espagne et en Italie	Variation relative du risque (%change)	ERU = $1,48.10^{-6} (\mu\text{g.m}^{-3})^{-1}$  ([EC] en moyenne journalière)
			Niveau de confiance : Fort
VTR long terme	Décès toutes causes non accidentelles  Strak <i>et al.</i> (2021) : analyse poolée de 8 cohortes européennes réalisée dans le cadre du projet ELAPSE	Fonction non linéaire d'hazard ratio*	ERU = $5,29.10^{-2} (10^{-5} \text{ m}^{-1})^{-1}$  <i>Pour affiner, utiliser la fonction paramétrique ci-dessous :</i>  ELR = $2,86.10^{-4} \times [\text{Abs}]^3 - 8,24.10^{-3} \times [\text{Abs}]^2 + 8,00.10^{-2} \times [\text{Abs}] + 4,49.10^{-3}$  ([Abs] en moyenne annuelle)
			Niveau de confiance : Fort

[Abs] : Niveau d'absorbance de la lumière dans l'atmosphère ; [EC] : concentration atmosphérique en carbone élémentaire (dans la fraction PM<sub>2,5</sub>) ; ERU : excès de risque unitaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ELR : excès de risque vie entière (excess lifetime risk) ; Lag : nombre de jours de décalage entre l'exposition et l'évènement de santé.

Pour une concentration moyenne annuelle en « carbone suie » comprise entre  $5,00.10^{-5}$  et  $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , la VTR long terme pourrait surestimer le risque du fait de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration et risque sur cette gamme. Pour affiner le calcul sur cette gamme, l'ERU peut être remplacé par la fonction paramétrique. En revanche, pour des concentrations supérieures à  $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , il n'est pas recommandé d'utiliser la fonction paramétrique en raison des fortes incertitudes sur la forme de la relation entre concentration et risque.

Le cas échéant, le GT et le CES rappellent qu'il existe des facteurs de conversion permettant de convertir les concentrations entre les trois métriques du « carbone suie ». Néanmoins, ces facteurs pouvant varier dans le temps et l'espace, il est recommandé d'utiliser, si disponible, un facteur de conversion propre à la méthode de mesure utilisée, à la zone géographique évaluée et à la période de temps considérée.

#### 4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du CES « Valeurs sanitaires de référence » portant sur l'élaboration de VTR par voie respiratoire pour différents indicateurs des particules de l'air ambiant : la fraction PM<sub>2,5</sub>, la fraction PM<sub>10</sub> et le « carbone suie » des particules de l'air ambiant.

Cet avis complète l'avis de l'Anses publié en janvier 2023 qui proposait une VTR long terme sans seuil pour les PM<sub>2,5</sub> – qui reste inchangée - en y ajoutant l'élaboration des VTR court terme par voie respiratoire pour les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> et l'élaboration des VTR court terme et long terme par voie respiratoire pour le « carbone suie ». S'agissant des particules ultrafines, l'étude antérieure de faisabilité, qui concluait que la construction de VTR n'était pas faisable à date à partir des études épidémiologiques, n'est pas reprise dans le présent avis. L'Agence poursuit en effet ses travaux en vue de proposer une VTR sur la base de cette étude de faisabilité et de nouvelles publications épidémiologiques et toxicologiques.

L'Anses rappelle que les VTR recommandées ici pour les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> concernent les conventions environnementales pour la mesure des particules de l'air ambiant<sup>22</sup>, sans spécificité de composition physico-chimique. Elles sont complétées par des VTR pour le « carbone suie », indicateur de diverses sources de combustion, qui a été ajouté dans le cadre de la refonte de la Directive européenne sur la qualité de l'air ambiant (sous les termes « carbone noir » et « carbone élémentaire ») parmi les polluants émergents, comme les particules ultrafines et le potentiel oxydant des particules. Ces VTR sont à utiliser séparément dans les calculs de risque (ex : sans sommer les excès de risque calculés avec la VTR PM<sub>2,5</sub> avec ceux calculés avec la VTR « carbone suie »). L'utilisation de ces VTR est également à compléter, dans le cas d'une pollution particulaire ayant une composition physico-chimique spécifique (ex : aérosols de particules enrichies en métaux ou en minéraux issues de source industrielle), par des calculs de risque utilisant les VTR dédiées aux substances chimiques particulières en question, séparés des calculs utilisant les VTR PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> ou « carbone suie ».

Les VTR proposées ont été établies pour être applicables dans les gammes de concentrations généralement observées en France ou en Europe.

De même, les VTR proposées sont construites à partir de données de mortalité et morbidité observées en France. Aussi, les valeurs recommandées auraient été différentes si une autre échelle géographique avait été considérée. Par exemple, s'agissant de la VTR long terme pour les PM<sub>2,5</sub>, l'utilisation de données de mortalité à l'échelle de l'Union Européenne aboutirait à un ERU de  $1,59 \cdot 10^{-2} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$  au lieu de celui recommandé ici de  $1,28 \cdot 10^{-2} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ .

L'Anses rappelle enfin que les PM<sub>2,5</sub>, les PM<sub>10</sub> et le « carbone suie » sont corrélés entre eux et avec d'autres polluants dans l'air ambiant. Les valeurs recommandées peuvent donc être le reflet des effets sanitaires de ces indicateurs de la pollution particulaire mais aussi d'une partie des effets des autres polluants corrélés.

---

<sup>22</sup> Par distinction avec les modalités de mesure d'application en santé au travail

Ces valeurs visent à fournir un outil utile aux acteurs impliqués dans l'interprétation des données de pollution de l'air. Elles permettront d'évaluer les particules et le « carbone suie » de l'air ambiant, avec une approche comparable à celle des substances chimiques, en exprimant une quantification du risque sanitaire, tout en restant attentif au fait que les valeurs utilisées usuellement pour établir les niveaux de risque acceptables<sup>23</sup> pour les substances chimiques ne sont pas directement transposables.

Néanmoins, les VTR proposées permettront de dépasser la simple comparaison des données de concentration à des valeurs guides ou réglementaires existantes pour les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> (il n'existe pas de valeur guide ou réglementaire pour le « carbone suie »).

L'Agence portera ces travaux d'expertise à la connaissance des agences homologues notamment en Europe en lien avec l'évolution de la réglementation sur la surveillance de la qualité de l'air en Europe annoncée par la révision de la Directive 2008/50/CE.

Pr Benoit Vallet

---

<sup>23</sup> Exprimés en ERI (excès de risque individuel) ou ELR (excès de risque vie entière)

## BIBLIOGRAPHIE

- Achilleos, S., M. A. Kioumourtzoglou, C. D. Wu, J. D. Schwartz, P. Koutrakis et S. I. Papatheodorou. 2017. "Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: A systematic review and meta-regression analysis." *Environ Int* 109: 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.09.010>.
- Anses. 2012. *Sélection des polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact des infrastructures routières*. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort), 1-202.
- Anses. 2017. *Valeurs toxicologiques de référence - Guide d'élaboration de l'Anses*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort). <https://www.anses.fr/fr/system/files/SUBSTANCES2017SA0016Ra.pdf>, 1-186.
- Anses. 2019. *Particules de l'air ambiant extérieur - Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort), 1-494.
- Anses. 2020. "VTR construites et choisies par l'Anses." Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. Consulté le 08 octobre 2021. [https://www.anses.fr/system/files/Affichage\\_VTR\\_VF\\_juin2021.XLSX](https://www.anses.fr/system/files/Affichage_VTR_VF_juin2021.XLSX).
- Anses. 2024a. *Elaboration et recommandation de VTR long terme pour les PM<sub>2,5</sub> et extrapolation aux PM<sub>10</sub>. Elaboration et recommandation de VTR court terme pour les PM<sub>2,5</sub> et les PM<sub>10</sub>*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort), 1-565.
- Anses. 2024b. *Elaboration et recommandation de VTR par voie respiratoire pour le carbone suie dans les particules de l'air ambiant extérieur*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort), 1-250.
- Anses. 2024c. *Faisabilité d'élaboration de VTR par voie respiratoire pour les particules ultrafines. Extrait du rapport d'expertise collective archivé « VTR par voie respiratoire pour les particules de l'air ambiant extérieur - Recommandation de VTR long terme pour les PM<sub>2,5</sub> et extrapolation aux PM<sub>10</sub> - Faisabilité d'élaboration de VTR pour le carbone suie et pour les particules ultrafines » (décembre 2021)*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort).
- Anses. à paraître. *Guide d'élaboration et de choix de valeurs de référence*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort), 1-285.
- Atkinson, R. W., S. Kang, H. R. Anderson, I. C. Mills et H. A. Walton. 2014. "Epidemiological time series studies of PM<sub>2.5</sub> and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis." *Thorax* 69 (7): 660-5. <https://doi.org/10.1136/thoraxinl-2013-204492>.
- Basagaña, X., B. Jacquemin, A. Karanasiou, B. Ostro, X. Querol, D. Agis, E. Alessandrini, J. Alguacil, B. Artiñano, M. Catrambone, J. D. de la Rosa, J. Díaz, A. Faustini, S. Ferrari, F. Forastiere, K. Katsouyanni, C. Linares, C. Perrino, A. Ranzi, I. Ricciardelli, E. Samoli, S. Zauli-Sajani, J. Sunyer et M. Stafoggia. 2015. "Short-term effects of particulate matter constituents on daily hospitalizations and mortality in five South-European cities: results from the MED-PARTICLES project." *Environ Int* 75: 151-8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.011>.
- Bi, J., R. R. D'Souza, S. Moss, N. Senthilkumar, A. G. Russell, N. C. Scovronick, H. H. Chang et S. Ebel. 2023. "Acute Effects of Ambient Air Pollution on Asthma Emergency

- Department Visits in Ten U.S. States." *Environ Health Perspect* 131 (4): 47003. <https://doi.org/10.1289/ehp11661>.
- Boogaard, H., A. P. Patton, R. W. Atkinson, J. R. Brook, H. H. Chang, D. L. Crouse, J. C. Fussell, G. Hoek, B. Hoffmann, R. Kappeler, M. Kutlar Joss, M. Ondras, S. K. Sagiv, E. Samoli, R. Shaikh, A. Smargiassi, A. A. Szpiro, E. D. S. Van Vliet, D. Vienneau, J. Weuve, F. W. Lurmann et F. Forastiere. 2022. "Long-term exposure to traffic-related air pollution and selected health outcomes: A systematic review and meta-analysis." *Environ Int* 164: 107262. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107262>.
- Brunekreef, B., M. Strak, J. Chen, Z. J. Andersen, R. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bellander, M.-C. Boutron, J. Brandt, I. Carey, G. Cesaroni, F. Forastiere, D. Focht, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, K. de Hoogh, D. Houthuijs, U. Hvidtfeldt, N. Janssen, J. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzler, J. Klompaker, N. H. Krog, S. Liu, P. Ljungman, A. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, S. Rodopoulou, E. Samoli, P. Schwarze, T. Sigsgaard, M. Stafoggia, D. Vienneau, G. Weinmayr, K. Wolf et G. Hoek. 2021. *Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM2.5, BC, NO2, and O3: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project. Research Report 208*. Health Effects Institute (HEI) (Boston, MA).
- Burnett, R., H. Chen, M. Szyszkowicz, N. Fann, B. Hubbell, C. A. Pope, 3rd, J. S. Apte, M. Brauer, A. Cohen, S. Weichenthal, J. Coggins, Q. Di, B. Brunekreef, J. Frostad, S. S. Lim, H. Kan, K. D. Walker, G. D. Thurston, R. B. Hayes, C. C. Lim, M. C. Turner, M. Jerrett, D. Krewski, S. M. Gapstur, W. R. Diver, B. Ostro, D. Goldberg, D. L. Crouse, R. V. Martin, P. Peters, L. Pinault, M. Tjepkema, A. van Donkelaar, P. J. Villeneuve, A. B. Miller, P. Yin, M. Zhou, L. Wang, N. A. H. Janssen, M. Marra, R. W. Atkinson, H. Tsang, T. Quoc Thach, J. B. Cannon, R. T. Allen, J. E. Hart, F. Laden, G. Cesaroni, F. Forastiere, G. Weinmayr, A. Jaensch, G. Nagel, H. Concin et J. V. Spadaro. 2018. "Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter." *Proc Natl Acad Sci USA* 115 (38): 9592-9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>.
- Chen, J. et G. Hoek. 2020. "Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis." *Environ Int* 143: 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>.
- Gehring, U., A. H. Wijga, G. Hoek, T. Bellander, D. Berdel, I. Brüske, E. Fuertes, O. Gruziova, J. Heinrich, B. Hoffmann, J. C. de Jongste, C. Klümper, G. H. Koppelman, M. Korek, U. Krämer, D. Maier, E. Melén, G. Pershagen, D. S. Postma, M. Standl, A. von Berg, J. M. Anto, J. Bousquet, T. Keil, H. A. Smit et B. Brunekreef. 2015. "Exposure to air pollution and development of asthma and rhinoconjunctivitis throughout childhood and adolescence: a population-based birth cohort study." *Lancet Respir Med* 3 (12): 933-42. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(15\)00426-9](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(15)00426-9).
- Goldbohm, R. A., E. L. Tielemans, D. Heederik, C. M. Rubingh, S. Dekkers, M. I. Willems et E. Dinant Kroese. 2006. "Risk estimation for carcinogens based on epidemiological data: a structured approach, illustrated by an example on chromium." *Regul Toxicol Pharmacol* 44 (3): 294-310. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2006.01.007>.
- HEI. 2020. *State of global air 2020. A special report on global exposure to air pollution and its health impacts*. Health Effects Institute (Boston, MA). <https://www.stateofglobalair.org/>.
- HEI. 2022. *Panel on the Health Effects of Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution - Systematic Review and Meta-analysis of Selected Health Effects of Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution. Special Report 23*. Health Effects Institute (Boston, MA).
- Hoek, G., R. M. Krishnan, R. Beelen, A. Peters, B. Ostro, B. Brunekreef et J. D. Kaufman. 2013. "Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review." *Environ Health* 12 (1): 43. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-12-43>.

- Host, S., A. Saunal, C. Honoré, F. Joly, A. Le Tertre et S. Medina. 2018. *Bénéfices sanitaires attendus d'une zone à faibles émissions : évaluation quantitative d'impact sanitaire prospective pour l'agglomération parisienne*. Observatoire régional de santé (ORS) Île-de-France (Paris, France). [https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/2018/Etude2018\\_8/ORS\\_benefices\\_sanitaires\\_attendus\\_ZFE\\_vd.pdf](https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/2018/Etude2018_8/ORS_benefices_sanitaires_attendus_ZFE_vd.pdf), 106 p.
- Hunter, N., C. R. Muirhead, F. Bochicchio et R. G. E. Haylock. 2015. "Calculation of lifetime lung cancer risks associated with radon exposure, based on various models and exposure scenarios." *Journal of Radiological Protection* 35 (3): 539-555. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/3/539>.
- Hvidtfeldt, U. A., G. Severi, Z. J. Andersen, R. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bellander, M. C. Boutron-Ruault, J. Brandt, B. Brunekreef, G. Cesaroni, J. Chen, H. Concin, F. Forastiere, C. H. van Gils, J. Gulliver, O. Hertel, G. Hoek, B. Hoffmann, K. de Hoogh, N. Janssen, K. H. Jockel, J. T. Jorgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, J. O. Klompmaker, N. H. Krog, A. Lang, K. Leander, S. Liu, P. L. S. Ljungman, P. K. E. Magnusson, A. J. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, G. Pershagen, R. S. Peter, A. Peters, M. Renzi, D. Rizzuto, S. Rodopoulou, E. Samoli, P. E. Schwarze, T. Sigsgaard, M. K. Simonsen, M. Stafoggia, M. Strak, D. Vienneau, G. Weinmayr, K. Wolf, O. Raaschou-Nielsen et D. Fecht. 2021. "Long-term low-level ambient air pollution exposure and risk of lung cancer - A pooled analysis of 7 European cohorts." *Environ Int* 146: 106249. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106249>.
- Hvidtfeldt, U. A., M. Sørensen, C. Geels, M. Ketzel, J. Khan, A. Tjønneland, K. Overvad, J. Brandt et O. Raaschou-Nielsen. 2019. "Long-term residential exposure to PM(2.5), PM(10), black carbon, NO(2), and ozone and mortality in a Danish cohort." *Environ Int* 123: 265-272. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.010>.
- ICRP. 2022. "Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152." *Ann ICRP* 152 (51).
- INERIS. 2020. "Portail Substances Chimiques." Institut national de l'environnement industriel et des risques. Consulté le 19/11. <https://substances.ineris.fr/fr/page/21>.
- Janssen, N. A. H., M. E. Gerlofs-Nijland, T. Lanki, R. O. Salonen, F. Cassee, G. Hoek, P. Fischer, B. Brunekreef et M. Krzyzanowski. 2012. *Health effects of black carbon*. Copenhagen: World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Janssen, N. A., G. Hoek, M. Simic-Lawson, P. Fischer, L. van Bree, H. ten Brink, M. Keuken, R. W. Atkinson, H. R. Anderson, B. Brunekreef et F. R. Cassee. 2011. "Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM10 and PM2.5." *Environ Health Perspect* 119 (12): 1691-9. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>.
- Khreis, H., C. Kelly, J. Tate, R. Parslow, K. Lucas et M. Nieuwenhuijsen. 2017. "Exposure to traffic-related air pollution and risk of development of childhood asthma: A systematic review and meta-analysis." *Environ Int* 100: 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.012>.
- Larrieu, S., J. F. Jusot, M. Blanchard, H. Prouvost, C. Declercq, P. Fabre, L. Pascal, A. L. Tertre, V. Wagner, S. Rivière, B. Chardon, D. Borrelli, S. Cassadou, D. Eilstein et A. Lefranc. 2007. "Short term effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular diseases in eight French cities: the PSAS program." *Sci Total Environ* 387 (1): 105-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.025>.
- Lefranc, A., M. Blanchard, D. Borelli, B. Chardon, C. Declercq, P. Fabre, J. F. Jusot, S. Larrieu, A. Le Tertre, L. Pascal, H. Prouvost, S. Rivière, V. Wagner, S. Cassadou et D. Eilstein. 2006. *Relations à court terme entre les niveaux de pollution atmosphérique et les admissions à l'hôpital dans huit villes françaises*. Institut de veille sanitaire. Programme de surveillance air et santé (Saint Maurice (France)). <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et->

[sante/air/documents/rapport-synthese/programme-de-surveillance-air-et-sante-psas-.relations-a-court-terme-entre-les-niveaux-de-pollution-atmospherique-et-les-admissions-a-l-hopital-d](#), 69 p.

- Levy, J. I., D. Diez, Y. Dou, C. D. Barr et F. Dominici. 2012. "A meta-analysis and multisite time-series analysis of the differential toxicity of major fine particulate matter constituents." *Am J Epidemiol* 175 (11): 1091-9. <https://doi.org/10.1093/aje/kwr457>.
- Liu, C., R. Chen, F. Sera, A. M. Vicedo-Cabrera, Y. Guo, S. Tong, Mszs Coelho, P. H. N. Saldiva, E. Lavigne, P. Matus, N. Valdes Ortega, S. Osorio Garcia, M. Pascal, M. Stafoggia, M. Scortichini, M. Hashizume, Y. Honda, M. Hurtado-Díaz, J. Cruz, B. Nunes, J. P. Teixeira, H. Kim, A. Tobias, C. Íñiguez, B. Forsberg, C. Åström, M. S. Ragettli, Y. L. Guo, B. Y. Chen, M. L. Bell, C. Y. Wright, N. Scovronick, R. M. Garland, A. Milojevic, J. Kyselý, A. Urban, H. Orru, E. Indermitte, J. J. K. Jaakkola, N. R. I. Ryti, K. Katsouyanni, A. Analitis, A. Zanobetti, J. Schwartz, J. Chen, T. Wu, A. Cohen, A. Gasparrini et H. Kan. 2019. "Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities." *N Engl J Med* 381 (8): 705-715. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>.
- Liu, S., J. T. Jørgensen, P. Ljungman, G. Pershagen, T. Bellander, K. Leander, P. K. E. Magnusson, D. Rizzuto, U. A. Hvidtfeldt, O. Raaschou-Nielsen, K/ Wolf, B. Hoffmann, B. Brunekreef, M. Strak, J. Chen, A. Mehta, R. W. Atkinson, M. Bauwelinck, R. Varraso, M.-C. Boutron-Ruault, J. Brandt, G. Cesaroni, F. Forastiere, D. Fecht, J. Gulliver, O. Hertel, K. de Hoogh, N. A. H. Janssen, K. Katsouyanni, Matthias Ketzel, J. O. Klompmaker, G. Nagel, B. Oftedal, A. Peters, A. Tjønneland, S. P. Rodopoulou, E. Samoli, D. T. Kristoffersen, T. Sigsgaard, M. Stafoggia, D. Vienneau, G. Weinmayr, G. Hoek et Z. J. Andersen. 2021. "Long-term exposure to low-level air pollution and incidence of asthma: the ELAPSE project." *Eur Respir J* 57 (6). <https://doi.org/10.1183/13993003.030992020>.
- Mustafić, H., P. Jabre, C. Caussin, M. H. Murad, S. Escolano, M. Tafflet, M. C. Périer, E. Marijon, D. Vernerey, J. P. Empana et X. Jouven. 2012. "Main air pollutants and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis." *JAMA - Journal of the American Medical Association* 307 (7): 713-721.
- Nhung, N. T. T., H. Amini, C. Schindler, M. Kutlar Joss, T. M. Dien, N. Probst-Hensch, L. Perez et N. Künzli. 2017. "Short-term association between ambient air pollution and pneumonia in children: A systematic review and meta-analysis of time-series and case-crossover studies." *Environ Pollut* 230: 1000-1008. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.063>.
- Nilsson Sommar, J., E. M. Andersson, N. Andersson, G. Sallsten, L. Stockfelt, P. L. Ljungman, D. Segersson, K. Eneroth, L. Gidhagen, P. Molnar, P. Wennberg, A. Rosengren, D. Rizzuto, K. Leander, A. Lager, P. K. Magnusson, C. Johansson, L. Barregard, T. Bellander, G. Pershagen et B. Forsberg. 2021. "Long-term exposure to particulate air pollution and black carbon in relation to natural and cause-specific mortality: a multicohort study in Sweden." *BMJ Open* 11 (9): e046040. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046040>.
- NRC. 1988. *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: BEIR IV*. <https://doi.org/10.17226/1026>. Washington, DC: The National Academies Press, National Research Council.
- NRC. 2009. *Science and Decisions: Advancing Risk Assessment*. <https://doi.org/10.17226/12209>. Washington, DC: The National Academies Press, National Research Council.
- Olstrup, H., C. Johansson et B. Forsberg. 2016. "The Use of Carbonaceous Particle Exposure Metrics in Health Impact Calculations." *Int J Environ Res Public Health* 13 (3). <https://doi.org/10.3390/ijerph13030249>.

- OMS. 2005. *Air quality guidelines. Global update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Organisation Mondiale de la Santé, bureau régional Europe [https://www.euro.who.int/data/assets/pdf\\_file/0005/78638/E90038.pdf](https://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf), 1-496.
- OMS. 2013a. *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: final technical report*. Organisation Mondiale de la Santé, bureau régional Europe. <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>, 1-309.
- OMS. 2013b. *Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide* <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-risks-of-air-pollution-in-europe-hrapie-project.-recommendations-for-concentrationresponse-functions-for-costbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogen-dioxide>. Organisation mondiale de la santé. <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-risks-of-air-pollution-in-europe-hrapie-project.-recommendations-for-concentrationresponse-functions-for-costbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogen-dioxide>, 60 p.
- OMS. 2017. *Long-term exposure to PM2.5 and PM10 and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis protocol - Update of WHO Global AQGs*. Organisation Mondiale de la Santé (OMS), bureau régional Europe [https://www.crd.york.ac.uk/PROSPEROFILES/82577\\_PROTOCOL\\_20190211.pdf](https://www.crd.york.ac.uk/PROSPEROFILES/82577_PROTOCOL_20190211.pdf), 1-21.
- OMS. 2020. "Health impact assessment." Organisation mondiale de la santé. Consulté le 22/11. [https://www.who.int/health-topics/health-impact-assessment#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/health-impact-assessment#tab=tab_1).
- OMS. 2021. *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2,5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO). <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>, 1-267.
- Orellano, P., J. Reynoso, N. Quaranta, A. Bardach et A. Ciapponi. 2020. "Short-term exposure to particulate matter (PM(10) and PM(2.5)), nitrogen dioxide (NO(2)), and ozone (O(3)) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis." *Environ Int* 142: 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>.
- Pascal, M., P. de Crouy Chanel, V. Wagner, M. Corso, C. Tillier, M. Bentayeb, M. Blanchard, A. Cochet, L. Pascal, S. Host, S. Gorla, A. Le Tertre, E. Chatignoux, A. Ung, P. Beaudeau et S. Medina. 2016. "The mortality impacts of fine particles in France." *Sci Total Environ* 571: 416-25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.213>.
- Pascal, Mathilde, Grégoire Falq, Vèrène Wagner, Edouard Chatignoux, Magali Corso, Myriam Blanchard, Sabine Host, Laurence Pascal et Sophie Larrieu. 2014. "Short-term impacts of particulate matter (PM10, PM10–2.5, PM2.5) on mortality in nine French cities." *Atmospheric Environment* 95: 175-184.
- Pedersen, M., L. Giorgis-Allemand, C. Bernard, I. Aguilera, A.-M. N. Andersen, F. Ballester, R. M. J. Beelen, L. Chatzi, M. Cirach, A. Danileviciute, A. Dedele, M. van Eijsden, M. Estarlich, A. Fernández-Somoano, M. F. Fernández, F. Forastiere, U. Gehring, R. Grazuleviciene, O. Gruzjeva, B. Heude, G. Hoek, K. de Hoogh, E. H. van den Hooven, S. E. Håberg, V. W. V. Jaddoe, C. Klümper, M. Korek, U. Krämer, A. Lerchundi, J. Lepeule, P. Nafstad, W. Nystad, E. Patelarou, D. Porta, A. Danileviciute, O. Raaschou-Nielsen, P. Rudnai, J. Sunyer, E. Stephanou, M. Sørensen, E. Thiering, D. Tuffnell, M. J. Varró, T. G. M. Vrijkotte, A. Wijga, M. Wilhelm, J. Wright, M. J. Nieuwenhuijsen, G. Pershagen, B. Brunekreef, M. Kogevinas et R. Slama. 2013. "Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study (ESCAPE)." *Lancet Respir Med* 1 (9): 695-704. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(13\)70192-9](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(13)70192-9).

- Petzold, A., J.A. Ogren, M. Fiebig, P. Laj, S.-M. Li, U. Baltensperger, T. Holzer-Popp, S. Kinne, G. Pappalardo, N. Sugimoto, C. Wehrli, A. Wiedensohler et X.-Y. Zhang. 2013. "Recommendations for reporting "black carbon" measurements." *Atmos Chem Phys* 13: 8365-8379.
- Pope, C. A., 3rd, N. Coleman, Z. A. Pond et R. T. Burnett. 2020. "Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies." *Environ Res* 183: 108924. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108924>.
- Pranata, R., R. Vania, A. E. Tondas, B. Setianto et A. Santoso. 2020. "A time-to-event analysis on air pollutants with the risk of cardiovascular disease and mortality: A systematic review and meta-analysis of 84 cohort studies." *J Evid Based Med* 13 (2): 102-115. <https://doi.org/10.1111/jebm.12380>.
- Santé Publique France. 2019. *Pollution atmosphérique. Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé (EQIS). EQIS avec une exposition modélisée*. Santé Publique France (Saint-Maurice, France). <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/documents/guide/pollution-atmospherique.-guide-pour-la-realisation-d-une-evaluation-quantitative-des-impacts-sur-la-sante-eqis.-eqis-avec-une-exposition-modelisee>, 1-92.
- Schwartz, J., F. Laden et A. Zanobetti. 2002. "The concentration-response relation between PM(2.5) and daily deaths." *Environ Health Perspect* 110 (10): 1025-1029. <https://doi.org/10.1289/ehp.021101025>.
- Shah, A. S. V., J. P. Langrish, H. Nair, D. A. McAllister, A. L. Hunter, K. Donaldson, D. E. Newby et N. L. Mills. 2013. "Global association of air pollution and heart failure: A systematic review and meta-analysis." *The Lancet* 382 (9897): 1039-1048.
- Song, X., Y. Hu, Y. Ma, L. Jiang, X. Wang, A. Shi, J. Zhao, Y. Liu, Y. Liu, J. Tang, X. Li, X. Zhang, Y. Guo et S. Wang. 2022. "Is short-term and long-term exposure to black carbon associated with cardiovascular and respiratory diseases? A systematic review and meta-analysis based on evidence reliability." *BMJ Open* 12 (5): e049516. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-049516>.
- Stafoggia, M., B. Oftedal, J. Chen, S. Rodopoulou, M. Renzi, R. W. Atkinson, M. Bauwelinck, J. O. Klompmaker, A. Mehta, D. Vienneau, Z. J. Andersen, T. Bellander, J. Brandt, G. Cesaroni, K. de Hoogh, D. Fehcht, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, U. A. Hvidtfeldt, K. H. Jöckel, J. T. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, D. T. Kristoffersen, A. Lager, K. Leander, S. Liu, P. L. S. Ljungman, G. Nagel, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, D. Rizzuto, S. Schramm, P. E. Schwarze, G. Severi, T. Sigsgaard, M. Strak, Y. T. van der Schouw, M. Verschuren, G. Weinmayr, K. Wolf, E. Zitt, E. Samoli, F. Forastiere, B. Brunekreef, G. Hoek et N. A. H. Janssen. 2022. "Long-term exposure to low ambient air pollution concentrations and mortality among 28 million people: results from seven large European cohorts within the ELAPSE project." *Lancet Planet Health* 6 (1): e9-e18. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00277-1](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00277-1).
- Strak, M., G. Weinmayr, S. Rodopoulou, J. Chen, K. de Hoogh, Z. J. Andersen, R. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bekkevold, T. Bellander, M. C. Boutron-Ruault, J. Brandt, G. Cesaroni, H. Concin, D. Fehcht, F. Forastiere, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, U. A. Hvidtfeldt, N. A. H. Janssen, K. H. Jöckel, J. T. Jørgensen, M. Ketzel, J. O. Klompmaker, A. Lager, K. Leander, S. Liu, P. Ljungman, P. K. E. Magnusson, A. J. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, D. Rizzuto, Y. T. van der Schouw, S. Schramm, G. Severi, T. Sigsgaard, M. Sorensen, M. Stafoggia, A. Tjønneland, W. M. M. Verschuren, D. Vienneau, K. Wolf, K. Katsouyanni, B. Brunekreef, G. Hoek et E. Samoli. 2021. "Long term exposure to low level air pollution and mortality in eight European cohorts within the ELAPSE project: pooled analysis." *BMJ* 374: n1904. <https://doi.org/10.1136/bmj.n1904>.

- Thurston, G. D., J. R. Balmes, E. Garcia, F. D. Gilliland, M. B. Rice, T. Schikowski, L. S. Van Winkle, I. Annesi-Maesano, E. G. Burchard, C. Carlsten, J. R. Harkema, H. Khreis, S. R. Kleeberger, U. P. Kodavanti, S. J. London, R. McConnell, D. B. Peden, K. E. Pinkerton, J. Reibman et C. W. White. 2020. "Outdoor Air Pollution and New-Onset Airway Disease. An Official American Thoracic Society Workshop Report." *Ann Am Thorac Soc* 17 (4): 387-398. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.202001-046ST>.
- Thurston, G. D., H. Kipen, I. Annesi-Maesano, J. Balmes, R. D. Brook, K. Cromar, S. De Matteis, F. Forastiere, B. Forsberg, M. W. Frampton, J. Grigg, D. Heederik, F. J. Kelly, N. Kuenzli, R. Laumbach, A. Peters, S. T. Rajagopalan, D. Rich, B. Ritz, J. M. Samet, T. Sandstrom, T. Sigsgaard, J. Sunyer et B. Brunekreef. 2017. "A joint ERS/ATS policy statement: what constitutes an adverse health effect of air pollution? An analytical framework." *Eur Respir J* 49: 1600419. <https://doi.org/10.1183/13993003.00419-2016>.
- US EPA. 2002. *Health Assessment of 1,3-Butadiene*. National Center for Environmental Assessment – Washington Office - Office of Research and Development - U.S. Environmental Protection Agency (Washington, DC). [https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris\\_documents/documents/supdocs/butasup.pdf](https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/supdocs/butasup.pdf), 1-435.
- US EPA. 2003. *Integrated Risk Information System (IRIS) summary for Diesel Engine Exhaust*. U.S. Environmental Protection Agency (Washington, DC). [https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris\\_documents/documents/subst/0642\\_summary.pdf#nameddest=rfc](https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0642_summary.pdf#nameddest=rfc), 1-36.
- US EPA. 2012. *Report to Congress on black carbon*. U.S. Environmental Protection Agency (Washington, DC).
- US EPA. 2019. *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, Dec 2019)*. U.S. Environmental Protection Agency (Washington, DC). <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534>, 1-1967.
- US EPA. 2021. "Reviewing National Ambient Air Quality Standards (NAAQS): Scientific and Technical Information." U.S. Environmental Protection Agency. Consulté le 5 novembre 2021. <https://www.epa.gov/naaqs>.
- Vodonas, A., Y. A. Awad et J. Schwartz. 2018. "The concentration-response between long-term PM<sub>2.5</sub> exposure and mortality; A meta-regression approach." *Environ Res* 166: 677-689. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.021>.
- Wagner, V., M. Pascal, M. Corso, A. Alari, T. Benmarhnia et A. Le Tertre. 2023. "On the supra-linearity of the relationship between air pollution, mortality and hospital admission in 18 French cities." *Int Arch Occup Environ Health* 96 (4): 551-563. <https://doi.org/10.1007/s00420-022-01948-3>.
- Wolf, K., B. Hoffmann, Z. J. Andersen, R. W. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bellander, J. Brandt, B. Brunekreef, G. Cesaroni, J. Chen, U. de Faire, K. de Hoogh, D. Fehcht, F. Forastiere, J. Gulliver, O. Hertel, U. A. Hvidtfeldt, N. A. H. Janssen, J. T. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, J. O. Klompaker, A. Lager, S. Liu, C. J. MacDonald, P. K. E. Magnusson, A. J. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, N. L. Pedersen, G. Pershagen, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, D. Rizzuto, S. Rodopoulou, E. Samoli, Y. T. van der Schouw, S. Schramm, P. Schwarze, T. Sigsgaard, M. Sørensen, M. Stafoggia, M. Strak, A. Tjønneland, W. M. M. Verschuren, D. Vienneau, G. Weinmayr, G. Hoek, A. Peters et P. L. S. Ljungman. 2021. "Long-term exposure to low-level ambient air pollution and incidence of stroke and coronary heart disease: a pooled analysis of six European cohorts within the ELAPSE project." *Lancet Planet Health* 5 (9): e620-e632. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00195-9](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00195-9).
- Xie, Z., Y. Li, Y. Qin et P. Rong. 2019. "Value Assessment of Health Losses Caused by PM<sub>2.5</sub> Pollution in Cities of Atmospheric Pollution Transmission Channel in the Beijing(-)Tianjin(-)Hebei Region, China." *Int J Environ Res Public Health* 16 (6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16061012>.

- Yang, J., M. J. Z. Sakhvidi, K. de Hoogh, D. Vienneau, J. Siemiatyck, M. Zins, M. Goldberg, J. Chen, E. Lequy et B. Jacquemin. 2021. "Long-term exposure to black carbon and mortality: A 28-year follow-up of the GAZEL cohort." *Environ Int* 157: 106805. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106805>.
- Yang, W. S., X. Wang, Q. Deng, W. Y. Fan et W. Y. Wang. 2014. "An evidence-based appraisal of global association between air pollution and risk of stroke." *Int J Cardiol* 175 (2): 307-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2014.05.044>.
- Yang, Y., Z. Ruan, X. Wang, Y. Yang, T. G. Mason, H. Lin et L. Tian. 2019. "Short-term and long-term exposures to fine particulate matter constituents and health: A systematic review and meta-analysis." *Environmental Pollution* 247: 874-882. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.12.060>.
- Zheng, X. Y., H. Ding, L. N. Jiang, S. W. Chen, J. P. Zheng, M. Qiu, Y. X. Zhou, Q. Chen et W. J. Guan. 2015. "Association between Air Pollutants and Asthma Emergency Room Visits and Hospital Admissions in Time Series Studies: A Systematic Review and Meta-Analysis." *PLoS One* 10 (9): e0138146. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138146>.

## MOTS-CLÉS

Carbone suie, carbone élémentaire, inhalation, particules, pollution de l'air ambiant, valeur toxicologique de référence, VTR.

*Air pollution, black carbon, elemental carbon, inhalation, particulate matter, toxicological reference value, TRV.*

## CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2024). Avis relatif à l'élaboration de VTR par voie respiratoire pour les particules de l'air ambiant extérieur (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) et le carbone suie de l'air ambiant extérieur (saisine 2019-SA-0198). Maisons-Alfort : Anses, 52 p.

**ANNEXE 1 – SUIVI DES ACTUALISATIONS DE L'AVIS**

Date	Page	Description de la modification
12/01/2023	-	Version initiale relative à la recommandation de VTR par voie respiratoire pour l'exposition à long terme aux particules de l'air ambiant extérieur (PM <sub>2,5</sub> ) et à la faisabilité d'élaborer des VTR pour le carbone suie et les particules ultrafines.
02/01/2023- 26/03/2024	/	<p><b>Chapitre 1 Contexte et objet de la saisine</b></p> <p>Partie 1.1 Contexte : ajout de texte en lien avec le carbone suie et les particules ultrafines (dernier paragraphe de la partie 1.1)</p> <p>Partie 1.2 Objet de la saisine : ajout et modification de texte en lien avec les nouveaux objets de la saisine</p> <p><b>Chapitre 2 Organisation de l'expertise</b> : ajout de texte en lien avec l'adoption par le CES VSR des nouveaux travaux (VTR court terme PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>, VTR long terme et court terme « carbone suie »), remplacement du tableau 1 sur la méthode d'instruction de la saisine (version initiale) par du texte</p> <p><b>Chapitre 3 Analyse et conclusions du CES et du GT</b></p> <p>Suppression de la partie 3.1.2. Particules ultrafines (version initiale)</p> <p>Partie 3.1.2. Carbone suie : modification du premier paragraphe pour introduire la notion de fraction carbonée des particules et pour apporter des précisions métrologiques</p> <p>Partie 3.2.1. Cinétique des particules inhalées : ajout du dernier paragraphe relatif au « carbone suie »</p> <p>Partie 3.2.2. Effets sur la santé : suppression du texte relatif aux particules ultrafines, remplacement du tableau 2 (version initiale) – Synthèse des effets sur la santé de l'exposition à long terme aux particules fines (PM<sub>2,5</sub>) par le tableau 1 – Synthèse des conclusions de rapports institutionnels sur les effets sur la santé de l'exposition aux particules fines (PM<sub>2,5</sub>) et au « carbone suie » (incluant les métriques BC, EC et Abs)</p> <p>Partie 3.2.3. Populations sensibles (version initiale) : suppression de cette partie</p> <p>Partie 3.3. Méthode de construction des VTR court terme et long terme pour les PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> et « carbone suie » de l'air ambiant : ajout et modification de texte et modification de figures pour inclure les VTR court terme et les VTR « carbone suie »</p> <p>Partie 3.4. Construction de la VTR court terme pour les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> de l'air ambiant : ajout de cette partie</p> <p>Partie 3.5. Faisabilité de construction des VTR pour le carbone suie et les particules ultrafines de l'air ambiant : suppression de la version initiale</p>

Date	Page	Description de la modification
		<p>Partie 3.6. Construction de la VTR court terme pour le « carbone suie » : ajout de cette partie</p> <p>Partie 3.7. Construction de la VTR long terme pour le « carbone suie » : ajout de cette partie</p> <p>Partie 3.8. Conclusions :</p> <p>Ajout du premier paragraphe apportant des informations sur l'utilisation des VTR PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> et « carbone suie »</p> <p>Partie 3.8.1. VTR court terme et long terme pour les PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> de l'air ambiant extérieur : ajout et modification de texte et modification de figures pour inclure les VTR court terme, pour inclure l'extrapolation aux PM<sub>10</sub> de la VTR long terme PM<sub>2,5</sub> et pour inclure les mises en perspective des niveaux de risque liés aux PM<sub>2,5</sub> calculés avec la VTR par rapport aux valeurs guides OMS et par rapport aux niveaux de risque acceptables liés aux rayonnements ionisants et au radon dans l'air</p> <p>Partie 3.6.2. relative à l'extrapolation aux PM<sub>10</sub> de la VTR long terme PM<sub>2,5</sub> : suppression de la version initiale</p> <p>Partie 3.6.3. relative à la faisabilité de recommander des VTR pour le carbone suie et pour les particules ultrafines : suppression de la version initiale</p> <p><b>Chapitre 4 Conclusions et recommandations de l'agence</b></p> <p>Mise à jour des conclusions et recommandations suite à l'actualisation réalisée depuis le précédent avis du 12 janvier 2023 et résumant les conclusions de ce précédent avis relatives à la faisabilité d'élaborer des VTR pour le « carbone suie » et pour les particules ultrafines.</p>

ANNEXE 2 – SYNTHÈSE DES VALEURS CANDIDATES A L'ELABORATION DE LA VTR COURT TERME POUR LES PM<sub>2,5</sub>

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	ERU en (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> sur la gamme de concentration en PM <sub>2,5</sub> de 3 à 100 µg.m <sup>-3</sup> [intervalle de confiance à 95% de l'ERU] (R <sup>2</sup> ) *		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de [PM <sub>2,5</sub> ] de 3 à 100 µg.m <sup>-3</sup>	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Hospitalisations causes pneumonie (<19 ans)	Modérée	Nhung <i>et al.</i> (2017)	Modéré	6,04.10 <sup>-7</sup> [1,34.10 <sup>-7</sup> ; 1,00.10 <sup>-6</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 6,04.10 <sup>-7</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]	FORT (4,1)
Hospitalisations causes cardiaques (>65 ans)	Forte	Atkinson <i>et al.</i> (2014)	Modéré	5,02.10 <sup>-7</sup> [4,86.10 <sup>-8</sup> ; 8,54.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 5,02.10 <sup>-7</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]	FORT (4,3)
Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires (>65 ans)	Forte	Atkinson <i>et al.</i> (2014)	Modéré	2,80.10 <sup>-7</sup> [1,41.10 <sup>-7</sup> ; 4,09.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 2,80.10 <sup>-7</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]	FORT (4,3)
Hospitalisations causes pathologies cardiaques ischémiques (>65 ans)	Forte	Lefranc <i>et al.</i> (2006)	Modéré	1,82.10 <sup>-7</sup> [9,95.10 <sup>-8</sup> ; 2,53.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 1,82.10 <sup>-7</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]	FORT (4,4)
Hospitalisations causes insuffisance cardiaque (>65 ans)	Forte	Atkinson <i>et al.</i> (2014)	Modéré	1,74.10 <sup>-7</sup> [6,05.10 <sup>-8</sup> ; 2,64.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 1,74.10 <sup>-7</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]	FORT (4,2)
Hospitalisations causes cardiaques	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	<u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [3-10] µg.m<sup>-3</sup></u> 1,65.10 <sup>-7</sup> [8,41.10 <sup>-8</sup> ; 2,44.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [10-100] µg.m<sup>-3</sup></u> 7,69.10 <sup>-9</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,56.10 <sup>-6</sup> [-2,23.10 <sup>-9</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,00.10 <sup>-6</sup> ; 1,83.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 2,26.10 <sup>-6</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [3-10] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = 1,65.10 <sup>-7</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]  <u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [10-100] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = 7,69.10 <sup>-9</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ] + 1,56.10 <sup>-6</sup>	FORT (4,8)
Hospitalisations toutes causes respiratoires (>65 ans)	Forte	Atkinson <i>et al.</i> (2014)	Modéré	7,91.10 <sup>-8</sup> [-7,82.10 <sup>-8</sup> ; 2,15.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 7,91.10 <sup>-8</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]	FORT (4,0)
Hospitalisations toutes causes respiratoires	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	<u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [3-20] µg.m<sup>-3</sup></u> 6,00.10 <sup>-8</sup> [3,92.10 <sup>-8</sup> ; 8,04.10 <sup>-8</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [20-100] µg.m<sup>-3</sup></u> -2,21.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,64.10 <sup>-6</sup> [-3,58.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,67.10 <sup>-6</sup> ; -2,48.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,85.10 <sup>-6</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [3-20] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = 6,00.10 <sup>-8</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ]  <u>[PM<sub>2,5</sub>] ∈ [20-100] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = -2,21.10 <sup>-8</sup> * [PM <sub>2,5</sub> ] + 1,64.10 <sup>-6</sup>	FORT (4,9)

Avis de l'Anses  
Saisine n° « 2019-SA-0198 »

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	ERU en $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ sur la gamme de concentration en $\text{PM}_{2,5}$ de 3 à $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [intervalle de confiance à 95% de l'ERU] ( $R^2$ ) *		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de $[\text{PM}_{2,5}]$ de 3 à $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires	Forte	Atkinson <i>et al.</i> (2014)	Modéré	$5,76 \cdot 10^{-8}$ $[1,11 \cdot 10^{-8}; 1,02 \cdot 10^{-7}]$ $(R^2 = 1,0)$		EDR = $5,76 \cdot 10^{-8} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,3)
Mortalité toutes causes non accidentelles	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	$[\text{PM}_{2,5}] \in [3-10] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ $4,90 \cdot 10^{-8}$ $[1,67 \cdot 10^{-8}; 7,71 \cdot 10^{-8}]$ $(R^2 = 1,0)$	$[\text{PM}_{2,5}] \in [10-100] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ $3,56 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 4,46 \cdot 10^{-7}$ $[2,43 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 1,61 \cdot 10^{-7};$ $5,02 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 7,13 \cdot 10^{-7}]$ $(R^2 = 1,0)$	$[\text{PM}_{2,5}] \in [3-10] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ EDR = $4,90 \cdot 10^{-8} * [\text{PM}_{2,5}]$  $[\text{PM}_{2,5}] \in [10-100] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ EDR = $3,56 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{2,5}] + 4,46 \cdot 10^{-7}$	FORT (4,9)
Hospitalisations causes pathologies cardiaques ischémiques	Forte	Lefranc <i>et al.</i> (2006)	Modéré	$3,20 \cdot 10^{-8}$ $[-1,54 \cdot 10^{-9}; 5,94 \cdot 10^{-8}]$ $(R^2 = 1,0)$		EDR = $3,20 \cdot 10^{-8} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,3)
Hospitalisations causes insuffisance cardiaque	Forte	Shah <i>et al.</i> (2013)	Modéré	$2,02 \cdot 10^{-8}$ $[1,40 \cdot 10^{-8}; 2,68 \cdot 10^{-8}]$ $(R^2 = 1,0)$		EDR = $2,02 \cdot 10^{-8} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,3)
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	$[\text{PM}_{2,5}] \in [3-10] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ $1,66 \cdot 10^{-8}$ $[4,95 \cdot 10^{-9}; 2,75 \cdot 10^{-8}]$ $(R^2 = 1,0)$	$[\text{PM}_{2,5}] \in [10-100] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ $4,87 \cdot 10^{-10} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 1,57 \cdot 10^{-7}$ $[-1,66 \cdot 10^{-10} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 6,81 \cdot 10^{-8};$ $1,71 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 2,54 \cdot 10^{-7}]$ $(R^2 = 1,0)$	$[\text{PM}_{2,5}] \in [3-10] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ EDR = $1,66 \cdot 10^{-8} * [\text{PM}_{2,5}]$  $[\text{PM}_{2,5}] \in [10-100] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ EDR = $4,87 \cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{2,5}] + 1,57 \cdot 10^{-7}$	FORT (5,0)
Mortalité toutes causes cardiaques (>74 ans)	Modérée	Pascal <i>et al.</i> (2014)	Modéré	$9,10 \cdot 10^{-9}$ $[0,00; 1,72 \cdot 10^{-8}]$ $(R^2 = 1,0)$		EDR = $9,10 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,6)
Hospitalisations cause accident vasculaire cérébral	Modérée	Shah <i>et al.</i> (2015)	Modéré	$5,09 \cdot 10^{-9}$ $[4,65 \cdot 10^{-9}; 5,53 \cdot 10^{-9}]$ $(R^2 = 1,0)$		EDR = $5,09 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,1)
Mortalité causes pathologies cardiaques ischémiques	Modérée	Atkinson <i>et al.</i> (2014)	Modéré	$2,35 \cdot 10^{-9}$ $[5,32 \cdot 10^{-10}; 3,82 \cdot 10^{-9}]$ $(R^2 = 1,0)$		EDR = $2,35 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,2)
Passages aux urgences pour asthme (<18 ans)	Forte	Host <i>et al.</i> (2018)	Modéré	$1,85 \cdot 10^{-9}$ $[3,17 \cdot 10^{-10}; 2,68 \cdot 10^{-9}]$ $(R^2 = 1,0)$		EDR = $1,85 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,3)

**Avis de l'Anses**  
**Saisine n° « 2019-SA-0198 »**

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	ERU en $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ sur la gamme de concentration en $\text{PM}_{2,5}$ de 3 à $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [intervalle de confiance à 95% de l'ERU] ( $R^2$ ) *	Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de $[\text{PM}_{2,5}]$ de 3 à $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Mortalité toutes causes respiratoires	Modérée	Liu <i>et al.</i> (2019)	Fort	<b><math>5,31\cdot 10^{-10}</math></b> [ $3,77\cdot 10^{-10}$ ; $6,53\cdot 10^{-10}$ ] ( $R^2 = 1,0$ )	EDR = $5,31\cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,6)
Mortalité cause accident vasculaire cérébral	Modérée	Orellano <i>et al.</i> (2020)	Fort	<b><math>4,58\cdot 10^{-10}</math></b> [ $7,84\cdot 10^{-11}$ ; $8,18\cdot 10^{-10}$ ] ( $R^2 = 1,0$ )	EDR = $4,58\cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,4)
Hospitalisations causes bronchopneumopathies chroniques obstructives (>65 ans)	Modérée	Atkinson <i>et al.</i> (2014)	Modéré	<b><math>2,80\cdot 10^{-10}</math></b> [ $1,26\cdot 10^{-10}$ ; $4,19\cdot 10^{-10}$ ] ( $R^2 = 1,0$ )	EDR = $2,80\cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{2,5}]$	FORT (4,2)

Valeurs présentées dans le tableau par ordre décroissant d'ERU. En gras : la ligne du tableau correspondant à l'ERU retenu pour l'élaboration de la VTR. \* L'unité de l'ERU («  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ») est rappelée dans le tableau lorsque ce dernier intègre une constante (intercept) afin de pouvoir distinguer le facteur de pente de la constante. En l'absence de rappel de l'unité de l'ERU, il s'agit du facteur de pente.  $[\text{PM}_{2,5}]$  : concentration moyenne journalière en  $\text{PM}_{2,5}$  ; AVC : accident vasculaire cérébral ; EDR : excès de risque journalier ; ERU : excès de risque unitaire = excès de risque journalier par unité de concentration  $\text{PM}_{2,5}$  ;  $R^2$  : coefficient de détermination de la droite de régression linéaire. Plus  $R^2$  est proche de 1 plus l'ajustement linéaire est performant. Pour la fonction paramétrique reliant EDR à  $[\text{PM}_{2,5}]$ , tous les coefficients de détermination de la courbe de régression linéaire sont égaux à 1,0 en arrondissant à la première décimale.

ANNEXE 3 – SYNTHÈSE DES VALEURS CANDIDATES A L'ELABORATION DE LA VTR COURT TERME POUR LES PM<sub>10</sub>

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	ERU en (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> sur la gamme de concentration en PM <sub>10</sub> de 4 à 200 µg.m <sup>-3</sup> [intervalle de confiance à 95% de l'ERU] (R <sup>2</sup> ) *		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de [PM <sub>10</sub> ] de 4 à 200 µg.m <sup>-3</sup>	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires (>65 ans)	Forte	Larrieu <i>et al.</i> (2007)	Modéré	2,30.10 <sup>-7</sup> [1,12.10 <sup>-7</sup> ; 3,40.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 2,30.10 <sup>-7</sup> * [PM10]	FORT (4,3)
Hospitalisations causes cardiaques (>65 ans)	Forte	Larrieu <i>et al.</i> (2007)	Modéré	2,12.10 <sup>-7</sup> [1,05.10 <sup>-7</sup> ; 2,95.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 2,12.10 <sup>-7</sup> * [PM10]	FORT (4,3)
Hospitalisations causes pathologies cardiaques ischémiques (>65 ans)	Forte	Larrieu <i>et al.</i> (2007)	Modéré	1,15.10 <sup>-7</sup> [6,99.10 <sup>-8</sup> ; 2,79.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 1,15.10 <sup>-7</sup> * [PM10]	FORT (4,4)
Hospitalisations toutes causes respiratoires (>65 ans)	Forte	Lefranc <i>et al.</i> (2006)	Modéré	7,70.10 <sup>-8</sup> [-6,92.10 <sup>-8</sup> ; 2,14.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 7,70.10 <sup>-8</sup> * [PM10]	FORT (4,4)
Hospitalisations causes cardiaques	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	<u>[PM10] ∈ [4-20] µg.m<sup>-3</sup></u> 7,34.10 <sup>-8</sup> [2,96.10 <sup>-8</sup> ; 1,11.10 <sup>-7</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM10] ∈ [20-200] µg.m<sup>-3</sup></u> 7,71.10 <sup>-9</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,33.10 <sup>-6</sup> [2,08.10 <sup>-9</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 7,12.10 <sup>-7</sup> ; 1,38.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,93.10 <sup>-6</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM10] ∈ [4-20] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = 7,34.10 <sup>-8</sup> * [PM10]  <u>[PM10] ∈ [20-200] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = 7,71.10 <sup>-9</sup> * [PM10] + 1,33.10 <sup>-6</sup>	FORT (4,8)
Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires	Forte	Larrieu <i>et al.</i> (2007)	Modéré	4,36.10 <sup>-8</sup> [6,56.10 <sup>-9</sup> ; 7,19.10 <sup>-8</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 4,36.10 <sup>-8</sup> * [PM10]	FORT (4,3)
Hospitalisations toutes causes respiratoires	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	<u>[PM10] ∈ [4-50] µg.m<sup>-3</sup></u> 3,15.10 <sup>-8</sup> [1,53.10 <sup>-8</sup> ; 9,42.10 <sup>-8</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM10] ∈ [50-200] µg.m<sup>-3</sup></u> -5,37.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 4,40.10 <sup>-6</sup> [-8,46.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 5,74.10 <sup>-6</sup> ; 1,17.10 <sup>-8</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup> + 1,64.10 <sup>-6</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>[PM10] ∈ [4-50] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = 3,15.10 <sup>-8</sup> * [PM10]  <u>[PM10] ∈ [50-200] µg.m<sup>-3</sup></u> EDR = -5,37.10 <sup>-8</sup> * [PM10] + 4,40.10 <sup>-6</sup>	FORT (4,9)
Hospitalisations causes pathologies cardiaques ischémiques	Forte	Larrieu <i>et al.</i> (2007)	Modéré	2,52.10 <sup>-8</sup> [1,15.10 <sup>-8</sup> ; 3,66.10 <sup>-8</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)		EDR = 2,52.10 <sup>-8</sup> * [PM10]	FORT (4,3)

Avis de l'Anses  
Saisine n° « 2019-SA-0198 »

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	ERU en $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ sur la gamme de concentration en $\text{PM}_{10}$ de 4 à $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [intervalle de confiance à 95% de l'ERU] ( $R^2$ ) *		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de $[\text{PM}_{10}]$ de 4 à $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Mortalité toutes causes non accidentelles	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	$\frac{[\text{PM}_{10}] \in [4-30] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{1,79 \cdot 10^{-8}}$ [1,03.10 <sup>-9</sup> ; 2,49.10 <sup>-8</sup> ] ( $R^2 = 1,0$ )	$\frac{[\text{PM}_{10}] \in ]30-200] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{1,19 \cdot 10^{-9} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 4,87 \cdot 10^{-7}}$ [-1,65.10 <sup>-9</sup> $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ + 4,46.10 <sup>-7</sup> ; 4,39.10 <sup>-9</sup> $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ + 6,13.10 <sup>-7</sup> ] ( $R^2 = 1,0$ )	$\frac{[\text{PM}_{10}] \in [4-30] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{\text{EDR} = 1,79 \cdot 10^{-8} * [\text{PM}_{10}]}$  $\frac{[\text{PM}_{10}] \in ]30-200] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{\text{EDR} = 1,19 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}] + 4,87 \cdot 10^{-7}}$	FORT (4,9)
Passages aux urgences pour asthme	Forte	Zheng <i>et al.</i> (2015)	Modéré	$\frac{1,17 \cdot 10^{-8}}{[4,50 \cdot 10^{-9} ; 1,83 \cdot 10^{-8}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $1,17 \cdot 10^{-8} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,1)
Mortalité toutes causes cardiaques (>74 ans)	Modérée	Pascal <i>et al.</i> (2014)	Modéré	$\frac{9,86 \cdot 10^{-9}}{[2,17 \cdot 10^{-9} ; 1,62 \cdot 10^{-8}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $9,86 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,6)
Mortalité causes pathologies cardiaques ischémiques (>74 ans)	Modérée	Pascal <i>et al.</i> (2014)	Modéré	$\frac{9,34 \cdot 10^{-9}}{[-6,68 \cdot 10^{-10} ; 1,70 \cdot 10^{-8}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $9,34 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,4)
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Forte	Wagner <i>et al.</i> (2023)	Fort	$\frac{[\text{PM}_{10}] \in [4-30] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{5,64 \cdot 10^{-9}}$ [2,72.10 <sup>-9</sup> ; 7,58.10 <sup>-9</sup> ] ( $R^2 = 1,0$ )	$\frac{[\text{PM}_{10}] \in ]30-200] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{-5,07 \cdot 10^{-10} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 1,89 \cdot 10^{-7}}$ [-1,51.10 <sup>-9</sup> $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ + 1,66.10 <sup>-7</sup> ; 5,85.10 <sup>-10</sup> $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ + 1,99.10 <sup>-7</sup> ] ( $R^2 = 1,0$ )	$\frac{[\text{PM}_{10}] \in [4-30] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{\text{EDR} = 5,64 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}]}$  $\frac{[\text{PM}_{10}] \in ]30-200] \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}}{\text{EDR} = -5,07 \cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{10}] + 1,89 \cdot 10^{-7}}$	FORT (5,0)
Hospitalisations cause AVC	Modérée	Yang <i>et al.</i> (2014)	Modéré	$\frac{3,25 \cdot 10^{-9}}{[4,81 \cdot 10^{-10} ; 5,81 \cdot 10^{-9}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $3,25 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,0)
Hospitalisations pour asthme	Forte	Zheng <i>et al.</i> (2015)	Modéré	$\frac{2,43 \cdot 10^{-9}}{[1,81 \cdot 10^{-9} ; 3,22 \cdot 10^{-9}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $2,43 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,3)
Mortalité toutes causes cardiaques	Modérée	Pascal <i>et al.</i> (2014)	Modéré	$\frac{1,29 \cdot 10^{-9}}{[0,00 ; 2,40 \cdot 10^{-9}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $1,29 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,6)
Hospitalisations pour infarctus du myocarde	Modérée	Mustafić <i>et al.</i> (2012)	Modéré	$\frac{1,25 \cdot 10^{-9}}{[1,24 \cdot 10^{-10} ; 1,59 \cdot 10^{-9}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $1,25 \cdot 10^{-9} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,1)
Mortalité toutes causes respiratoires	Modérée	Orellano <i>et al.</i> (2020)	Fort	$\frac{6,27 \cdot 10^{-10}}{[1,24 \cdot 10^{-10} ; 1,08 \cdot 10^{-9}]}$ ( $R^2 = 1,0$ )		EDR = $6,27 \cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,7)

Avis de l'Anses  
Saisine n° « 2019-SA-0198 »

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	ERU en $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ sur la gamme de concentration en $\text{PM}_{10}$ de 4 à $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [intervalle de confiance à 95% de l'ERU] ( $R^2$ ) *	Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de $[\text{PM}_{10}]$ de 4 à $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Mortalité causes pathologies cardiaques ischémiques	Modérée	Pascal <i>et al.</i> (2014)	Modéré	<b><math>6,04 \cdot 10^{-10}</math></b> [-3,33.10 <sup>-10</sup> ; 1,38.10 <sup>-9</sup> ] ( $R^2 = 1,0$ )	EDR = $6,04 \cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,4)
Mortalité cause accident vasculaire cérébral	Modérée	Orellano <i>et al.</i> (2020)	Fort	<b><math>2,79 \cdot 10^{-10}</math></b> [1,42.10 <sup>-10</sup> ; 4,11.10 <sup>-10</sup> ] ( $R^2 = 1,0$ )	EDR = $2,79 \cdot 10^{-10} * [\text{PM}_{10}]$	FORT (4,9)

Valeurs présentées dans le tableau par ordre décroissant d'ERU. En gras : la ligne du tableau correspondant à l'ERU retenu pour l'élaboration de la VTR. \* L'unité de l'ERU («  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ») est rappelée dans le tableau lorsque ce dernier intègre une constante (intercept) afin de pouvoir distinguer le facteur de pente de la constante. En l'absence de rappel de l'unité de l'ERU, il s'agit du facteur de pente.  $[\text{PM}_{10}]$  : concentration moyenne journalière en  $\text{PM}_{10}$  ; AVC : accident vasculaire cérébral ; EDR : excès de risque journalier ; ERU : excès de risque unitaire = excès de risque journalier par unité de concentration  $\text{PM}_{10}$  ;  $R^2$  : coefficient de détermination de la droite de régression linéaire. Plus  $R^2$  est proche de 1 plus l'ajustement linéaire est performant. Pour la fonction paramétrique reliant EDR à  $[\text{PM}_{10}]$ , tous les coefficients de détermination de la courbe de régression linéaire sont égaux à 1,0 en arrondissant à la première décimale.

ANNEXE 4 – SYNTHÈSE DES VALEURS CANDIDATES A L'ÉLABORATION DE LA VTR LONG TERME POUR LES PM<sub>2,5</sub>

Évènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sup>-1</sup> [intervalle de confiance à 95 %] sur la gamme de concentration en PM <sub>2,5</sub> de 4,9 à 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (R <sup>2</sup> )		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'ELR en fonction de la concentration en PM <sub>2,5</sub> [PM <sub>2,5</sub> ] de 4,9 à 30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Mortalité toutes causes non accidentelles	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	<u>De 4,9 à 15 <math>\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}</math></u> $1,28\cdot 10^{-2}$ [9,37.10 <sup>-3</sup> ; 1,77.10 <sup>-2</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	<u>De 15 à 30 <math>\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}</math></u> $2,67\cdot 10^{-3} (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} + 1,47\cdot 10^{-1}$ [2,20.10 <sup>-3</sup> ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sup>-1</sup> + 1,14.10 <sup>-1</sup> ; 2,89.10 <sup>-3</sup> ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) <sup>-1</sup> + 2,00.10 <sup>-1</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	ELR = $2,19\cdot 10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 1,51\cdot 10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 3,61\cdot 10^{-2} \times [\text{PM}_{2,5}] - 8,83\cdot 10^{-2}$	Fort (4,8)
Incidence de l'asthme chez l'adulte	Modérée	Liu <i>et al.</i> (2021)	Modéré		$4,62\cdot 10^{-3}$ [3,26.10 <sup>-3</sup> ; 1,81.10 <sup>-2</sup> ] (R <sup>2</sup> = 0,8)	ELR = $1,46\cdot 10^{-6} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 1,58\cdot 10^{-4} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 7,47\cdot 10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}] + 1,38\cdot 10^{-3}$	Modéré (3,6)
Incidence de l'asthme chez l'enfant	Forte	Khreis <i>et al.</i> (2017)	Fort		$3,87\cdot 10^{-3}$ [1,59.10 <sup>-3</sup> ; 4,99.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> = 0,9)	ELR = $7,94\cdot 10^{-7} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 9,80\cdot 10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 5,73\cdot 10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}] + 5,60\cdot 10^{-4}$	Fort (4,7)
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort		$1,99\cdot 10^{-3}$ [9,92.10 <sup>-4</sup> ; 2,52.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> = 0,8)	ELR = $2,80\cdot 10^{-6} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 2,23\cdot 10^{-4} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 6,39\cdot 10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}] - 1,60\cdot 10^{-2}$	Fort (4,9)
Faible poids de naissance	Modérée	Pedersen <i>et al.</i> (2013)	Fort		$1,64\cdot 10^{-3}$ [7,05.10 <sup>-4</sup> ; 2,11.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> = 0,9)	ELR = $2,82\cdot 10^{-7} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 3,71\cdot 10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 2,27\cdot 10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}] + 1,55\cdot 10^{-4}$	Fort (4,3)
Incidence d'AVC	Forte	Brunekreef <i>et al.</i> (2021)	Fort		$1,37\cdot 10^{-3}$ [2,38.10 <sup>-4</sup> ; 2,37.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> = 0,9)	ELR = $1,15\cdot 10^{-6} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 1,09\cdot 10^{-4} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 3,84\cdot 10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}] - 1,17\cdot 10^{-2}$	Fort (4,9)
Incidence du cancer du poumon	Modérée	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2021)	Fort		$9,56\cdot 10^{-4}$ [2,16.10 <sup>-4</sup> ; 1,54.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> = 0,8)	ELR = $1,13\cdot 10^{-6} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 9,21\cdot 10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 2,78\cdot 10^{-3} \times [\text{PM}_{2,5}] - 6,37\cdot 10^{-3}$	Fort (4,6)
Mortalité par cardiopathie ischémique	Modérée	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort		$4,20\cdot 10^{-4}$ [1,58.10 <sup>-4</sup> ; 7,08.10 <sup>-4</sup> ] (R <sup>2</sup> = 1,0)	ELR = $2,23\cdot 10^{-7} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 2,12\cdot 10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 8,89\cdot 10^{-4} \times [\text{PM}_{2,5}] - 2,04\cdot 10^{-3}$	Fort (4,5)
Mortalité toutes causes respiratoires	Modérée	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort		$3,05\cdot 10^{-4}$ [-1,96.10 <sup>-4</sup> ; 6,88.10 <sup>-4</sup> ] (R <sup>2</sup> = 0,8)	ELR = $2,66\cdot 10^{-7} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 2,65\cdot 10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 9,04\cdot 10^{-4} \times [\text{PM}_{2,5}] - 2,65\cdot 10^{-3}$	Fort (4,8)

Avis de l'Anses  
Saisine n° « 2019-SA-0198 »

Évènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en $(\mu\text{g.m}^{-3})^{-1}$ [intervalle de confiance à 95 %] sur la gamme de concentration en $\text{PM}_{2,5}$ de 4,9 à $30 \mu\text{g.m}^{-3}$ ( $R^2$ )		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'ELR en fonction de la concentration en $\text{PM}_{2,5}$ [ $\text{PM}_{2,5}$ ] de 4,9 à $30 \mu\text{g.m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Mortalité par BPCO	Modérée	Strak et al. (2021)	Fort	De 4,9 à $15 \mu\text{g.m}^{-3}$ $2,67 \cdot 10^{-4}$ [-7,41.10 <sup>-7</sup> + 9,71.10 <sup>-5</sup> ; 3,46.10 <sup>-4</sup> + 1,90.10 <sup>-3</sup> ] ( $R^2 = 1,0$ )	De 15 à $30 \mu\text{g.m}^{-3}$ $7,61 \cdot 10^{-5} (\mu\text{g.m}^{-3})^{-1} + 2,83 \cdot 10^{-3}$ [-4,38.10 <sup>-6</sup> ( $\mu\text{g.m}^{-3})^{-1} + 9,71 \cdot 10^{-5}$ ; 3,47.10 <sup>-5</sup> ( $\mu\text{g.m}^{-3})^{-1} + 6,37 \cdot 10^{-3}$ ] ( $R^2 = 1,0$ )	$\text{ELR} = 2,54 \cdot 10^{-7} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 2,04 \cdot 10^{-5} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 5,91 \cdot 10^{-4} \times [\text{PM}_{2,5}] - 1,24 \cdot 10^{-3}$	Fort (4,6)
Mortalité par infection des voies respiratoires inférieures	Modérée	Burnett et al. (2018)	Modéré	$1,19 \cdot 10^{-4}$ [6,60.10 <sup>-5</sup> ; 1,59.10 <sup>-4</sup> ] ( $R^2 = 1$ )		$\text{ELR} = -3,39 \cdot 10^{-8} \times [\text{PM}_{2,5}]^3 - 5,19 \cdot 10^{-7} \times [\text{PM}_{2,5}]^2 + 1,73 \cdot 10^{-4} \times [\text{PM}_{2,5}] - 4,44 \cdot 10^{-4}$	Fort (4,1)

AVC : accident vasculaire cérébral ; BPCO : broncho-pneumopathie chronique obstructive ; ELR : excès de risque vie entière (sauf pour l'incidence de l'asthme chez l'enfant où l'excès de risque est calculé sur la période <1-19 ans, et pour le faible poids de naissance où l'excès de risque est calculé pour une exposition durant la période entière de grossesse) ; ERU : excès de risque unitaire ;  $R^2$  : coefficient de détermination de la droite de régression linéaire permettant de calculer l'ERU. Pour la fonction paramétrique reliant ELR à  $[\text{PM}_{2,5}]$ , tous les coefficients de détermination de la courbe de régression polynomiale sont égaux à 1,0 en arrondissant à la première décimale.

**ANNEXE 5 – SYNTHÈSE DES VALEURS CANDIDATES A L'ELABORATION DE LA VTR COURT TERME POUR LE « CARBONE SUIE »**

Évènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en $(\mu\text{g.m}^{-3})^{-1}$ [intervalle de confiance à 95 %] sur la gamme de concentration en carbone élémentaire de 0,2 à 15,0 $\mu\text{g.m}^{-3}$ ( $R^2$ )	Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de la concentration en carbone élémentaire [EC] de 0,2 à 15,0 $\mu\text{g.m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires	Forte	Basagaña et al. (2015) <sup>A</sup>	Modéré	$1,48.10^{-6}$ [ $3,83.10^{-7}$ ; $2,35.10^{-6}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $1,48.10^{-6} \times [\text{EC}]$	4,5
Hospitalisations toutes causes respiratoires	Forte	Basagaña et al. (2015) <sup>B</sup>	Modéré	$7,44.10^{-7}$ [ $2,96.10^{-8}$ ; $1,30.10^{-6}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $7,44.10^{-7} \times [\text{EC}]$	4,4
Visites aux urgences pour asthme	Modérée	Bi et al. (2023) <sup>C</sup>	Modéré	$2,20.10^{-7}$ [ $6,01.10^{-8}$ ; $3,45.10^{-7}$ ] ( $R^2=0,99$ )	EDR = $2,20.10^{-7} \times [\text{EC}]$	4,4
Mortalité toutes causes non accidentelles	Forte	Achilleos et al. (2017) <sup>D</sup>	Modéré	$7,61.10^{-8}$ [ $2,95.10^{-8}$ ; $1,21.10^{-7}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $7,61.10^{-8} \times [\text{EC}]^*$	4,2
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Forte	Basagaña et al. (2015) <sup>E</sup>	Modéré	$3,06.10^{-8}$ [ $1,79.10^{-10}$ ; $5,72.10^{-8}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $3,06.10^{-8} \times [\text{EC}]$	4,3
Mortalité toutes causes respiratoires	Forte	Basagaña et al. (2015) <sup>F</sup>	Modéré	$2,22.10^{-8}$ [ $6,80.10^{-9}$ ; $3,35.10^{-8}$ ] ( $R^2=0,99$ )	EDR = $2,22.10^{-8} \times [\text{EC}]$	4,2

A : carbone élémentaire dans la fraction PM<sub>2,5</sub> sur lag 0. B : carbone élémentaire dans la fraction PM<sub>2,5</sub> sur lag 1. C : carbone élémentaire sur lag cumulé 0-7, tous âges. D : mélange de carbone élémentaire et carbone suie, lags mixtes. E : carbone élémentaire dans la fraction PM<sub>10</sub> sur lag 2. F : carbone élémentaire dans la fraction PM<sub>10</sub> sur lag 1. \* La métrique EC est considérée pertinente car la majorité des études incluses dans la méta-analyse de Achilleos et al. examine cette métrique. EC : carbone élémentaire ; EDR : excès de risque journalier (excess daily risk) ; ERU : excès de risque unitaire ;  $R^2$  : coefficient de détermination de la droite de régression linéaire permettant de calculer l'ERU.

ANNEXE 6 – SYNTHÈSE DES VALEURS CANDIDATES A L'ELABORATION DE LA VTR LONG TERME POUR LE « CARBONE SUIE »

Évènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en $(.10^{-5} \text{ m}^{-1})^{-1}$ [intervalle de confiance à 95%] sur la gamme de concentration déterminée, en équivalent-absorbance [abs] ( $R^2$ )		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'ELR en fonction de la concentration en équivalent-absorbance [abs] de $0,55.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Incidence de l'asthme chez l'adulte	Modérée	Liu <i>et al.</i> (2021)	Modéré	De $0,55.10^{-5}$ à $5,00.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $6,79.10^{-2}$ [ $4,85.10^{-2}$ ; $7,98.10^{-2}$ ] ( $R^2=0,82$ )	De $5,00.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $8,14.10^{-3}$ [abs] + $2,66.10^{-1}$ [ $1,35.10^{-2}$ [abs] + $1,65.10^{-1}$ ; $4,15.10^{-3}$ [abs] + $3,20.10^{-1}$ ] ( $R^2=0,91$ )	ELR = $-4,00.10^{-5} \times [\text{abs}]^4 + 1,39.10^{-3} \times [\text{abs}]^3 - 1,86.10^{-2} \times [\text{abs}]^2 + 1,23.10^{-1} \times [\text{abs}]$	3,9
Mortalité toutes causes non accidentelles	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De $0,55.10^{-5}$ à $5,00.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $5,29.10^{-2}$ [ $4,64.10^{-2}$ ; $6,01.10^{-2}$ ] ( $R^2=0,87$ )	De $5,00.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $5,09.10^{-3}$ [abs] + $2,15.10^{-1}$ [ $5,91.10^{-4}$ [abs] + $2,15.10^{-1}$ ; $5,50.10^{-3}$ [abs] + $2,36.10^{-1}$ ] ( $R^2=0,82$ )	ELR = $2,86.10^{-4} \times [\text{abs}]^3 - 8,24.10^{-3} \times [\text{abs}]^2 + 8,00.10^{-2} \times [\text{abs}] + 4,49.10^{-3}$	4,6
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Modérée	Yang <i>et al.</i> (2021)	Modéré	De $0,55.10^{-5}$ à $5,00.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $1,54.10^{-2}$ [ $-1,11.10^{-2}$ ; $2,23.10^{-2}$ ] ( $R^2=0,92$ )	De $5,00.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $2,94.10^{-3}$ [abs] + $5,80.10^{-2}$ [ $-2,24.10^{-2}$ [abs] + $6,26.10^{-2}$ ; $6,08.10^{-4}$ [abs] + $9,00.10^{-2}$ ] ( $R^2=0,94$ )	ELR = $5,77.10^{-5} \times [\text{abs}]^3 - 1,84.10^{-3} \times [\text{abs}]^2 + 2,12.10^{-2} \times [\text{abs}] + 2,17.10^{-3}$	4,2
Incidence d'AVC	Modérée	Wolf <i>et al.</i> (2021)	Modéré	De $0,55.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $5,94.10^{-3}$ [ $3,62.10^{-3}$ ; $8,24.10^{-3}$ ] ( $R^2=0,65$ )		ELR = $3,46.10^{-5} \times [\text{abs}]^3 - 1,08.10^{-3} \times [\text{abs}]^2 + 1,29.10^{-2} \times [\text{abs}] + 1,65.10^{-3}$	4,1
Petit poids de naissance	Modérée	Pedersen <i>et al.</i> (2013)	Modéré	De $0,55.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $5,42.10^{-3}$ [ $-4,99.10^{-3}$ ; $6,75.10^{-3}$ ] ( $R^2=0,81$ )		ELR = $1,88.10^{-5} \times [\text{abs}]^3 - 6,98.10^{-4} \times [\text{abs}]^2 + 1,03.10^{-2} \times [\text{abs}] + 4,83.10^{-4}$	4,2
Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Modérée	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De $0,55.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $2,15.10^{-3}$ [ $1,29.10^{-3}$ ; $2,46.10^{-3}$ ] ( $R^2=0,90$ )		ELR = $2,34.10^{-6} \times [\text{abs}]^3 - 1,90.10^{-4} \times [\text{abs}]^2 + 3,96.10^{-3} \times [\text{abs}] - 1,42.10^{-3}$	4,4
Mortalité toutes causes respiratoires	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De $0,55.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $1,90.10^{-3}$ [ $1,13.10^{-3}$ ; $2,29.10^{-3}$ ] ( $R^2=0,74$ )		ELR = $1,06.10^{-5} \times [\text{abs}]^3 - 3,31.10^{-4} \times [\text{abs}]^2 + 4,07.10^{-3} \times [\text{abs}] + 8,87.10^{-5}$	4,3
Mortalité de cause BPCO	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De $0,55.10^{-5}$ à $5,00.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $1,40.10^{-3}$ [ $5,53.10^{-4}$ ; $1,86.10^{-3}$ ] ( $R^2=0,94$ )	De $5,00.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $3,16.10^{-4}$ [abs] + $5,12.10^{-3}$ [ $3,52.10^{-4}$ [abs] + $1,03.10^{-3}$ ; $1,57.10^{-4}$ [abs] + $7,55.10^{-3}$ ] ( $R^2=0,95$ )	ELR = $4,62.10^{-6} \times [\text{abs}]^3 - 1,54.10^{-4} \times [\text{abs}]^2 + 1,90.10^{-3} \times [\text{abs}] + 1,41.10^{-4}$	4,3

Avis de l'Anses  
Saisine n° « 2019-SA-0198 »

Évènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en $(.10^{-5} \text{ m}^{-1})^{-1}$ [intervalle de confiance à 95%] sur la gamme de concentration déterminée, en équivalent-absorbance [abs] ( $R^2$ )	Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'ELR en fonction de la concentration en équivalent-absorbance [abs] de $0,55.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
Incidence de l'asthme de l'enfant	Modérée	Gehring <i>et al.</i> (2015)	Fort	De $0,55.10^{-5}$ à $12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ : $8,03.10^{-4}$ [0,00 ; $9,01.10^{-4}$ ] ( $R^2=0,55$ )	$ELR = 5,09.10^{-6} \times [\text{abs}]^3 - 1,62.10^{-4} \times [\text{abs}]^2 + 1,86.10^{-3} \times [\text{abs}] + 1,83.10^{-4}$	4,6

AVC : accident vasculaire cérébral ; BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive ; ELR : excès de risque vie entière (excess lifetime risk) ; ERU : excès de risque unitaire ;  $R^2$  : coefficient de détermination de la droite de régression linéaire permettant de calculer l'ERU.

---

## **Valeurs toxicologiques de référence (VTR)**

**Elaboration et recommandation de VTR par voie respiratoire pour le carbone suie dans les particules de l'air ambiant extérieur**

---

**Mission permanente « Valeurs toxicologiques de référence »**

**Saisine « n°2019-SA-0198 »**

# **RAPPORT d'expertise collective**

**Comité d'experts spécialisé « Valeurs sanitaires de référence »**

**Comité d'experts spécialisé  
« Valeurs sanitaires de référence »**

**Groupe de travail « VTR particules de l'air ambiant extérieur »**

**Décembre 2023**

### **Citation suggérée**

---

Anses. (2024). Valeurs toxicologiques de référence (VTR) Elaboration et recommandation de VTR par voie respiratoire pour le carbone suie dans les particules de l'air ambiant extérieur (saisine 2019-SA-0198). Maisons-Alfort : Anses, 238 p.

### **Mots clés**

---

Carbone suie, carbone élémentaire, inhalation, particules, pollution de l'air ambiant, valeur toxicologique de référence, VTR.

*Air pollution, black carbon, elemental carbon, inhalation, particulate matter, toxicological reference value, TRV.*

## Présentation des intervenants

**PRÉAMBULE** : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, intuitu personae, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

### GROUPE DE TRAVAIL « VTR PARTICULES »

---

#### Présidente

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de Recherche à l'Inserm – Compétences : épidémiologie environnementale et pollution atmosphérique

#### Membres

Mme Myriam BLANCHARD – Chargée de projet en épidémiologie (Cellule régionale Normandie, Santé Publique France) – Compétences : épidémiologie des pathologies liées aux particules

Mme Anne CHEVALIER – Retraitée de l'Institut de Veille Sanitaire – Compétences : épidémiologie

M. Jean-Ulrich MULLOT – Pharmacien, chef du Laboratoire d'Analyses de Surveillance et d'Expertise de la Marine de Toulon (Service de santé des armées) – Compétences : chimie analytique, évaluation des risques sanitaires environnementaux et professionnels

### EXPERT RAPPORTEUR

---

Mme Marine SAVOURE – Ingénieure de recherche à l'Inserm – Compétences : épidémiologie environnementale et pollution atmosphérique

### COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

---

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant.

- CES « Valeurs sanitaires de références » (2020-2024) – 20 mai 2022, 30 juin 2022, 8 décembre 2022, 29 juin 2023, 14 septembre 2023, 9 novembre 2023 et 15 décembre 2023.

#### Président

M. Fabrice MICHIELS – Médecin du travail / toxicologue au Service de prévention et santé au travail de Corrèze et de Dordogne (SPST 19-24) – Compétences : Médecine du travail, toxicologie

#### Vice-président

Mme Anne MAITRE – Professeur des Universités – Praticien Hospitalier (PU-PH) au Laboratoire de Toxicologie Professionnelle et Environnementale, CHU de Grenoble ; Responsable de l'équipe « Environnement et prédiction de la santé des populations », Laboratoire TIMC, Université Grenoble Alpes – Compétences : médecine ; toxicologie ; IBE ; métrologie des polluants ; hygiène industrielle – Démission en mars 2023

M. Jérôme THIREAU – PhD, Chargé de recherche au CNRS - Compétences : physiologie animale ; électrophysiologie ; biologie cellulaire ; cardiotoxicité – A compter d'avril 2023

## Membres

M. Benoît ATGE – Médecin du Travail, Médecin Toxicologue, AHI33. – Compétences : Toxicologie, Médecine, Santé au Travail, biosurveillance, agents cytotoxiques, évaluation des expositions, contaminations surfaciques - A compter de novembre 2023

M. Luc BELZUNCES – Directeur de Recherche et Directeur du Laboratoire de Toxicologie Environnementale à l'INRAE – Compétences : toxicologie générale ; neurotoxicologie, écotoxicologie ; chimie analytique ; évaluation des risques

Mme Michèle BISSON – Toxicologue Responsable d'étude à l'Ineris – Compétences : pharmacien toxicologue ; VTR ; évaluation des risques sanitaires

Mme Céline BOTINEAU – Ingénieur de prévention du risque chimique au CEA – Compétences : hygiène industrielle ; chimie ; évaluation des risques - Démission en novembre 2022

Mme Anne CHEVALIER – Retraitée de l'Institut de Veille Sanitaire – Compétences : épidémiologie

M. François CLINARD – Épidémiologiste à l'Agence Santé Publique France – Compétences : pharmacien toxicologue ; épidémiologie ; évaluation des risques sanitaires – Démission en mars 2023

Mme Fatiha EL-GHISSASSI – Scientifique, Programme des Monographies. Evidence Synthesis and Classification Branch. Centre International de Recherche sur le Cancer – Compétences : biochimie spécialiste en cancérogénèse et génotoxicité

M. Claude EMOND – Professeur associé – École de santé publique, Université de Montréal, Département de santé environnementale et santé au travail – Compétences : toxicologie ; modèle PBPK ; toxicocinétique ; nanotoxicologie ; perturbateurs endocriniens

M. Robert GARNIER – Médecin toxicologue, Paris – Compétences : toxicologie médicale ; santé au travail ; santé environnementale

Mme Perrine HOET – Professeur à l'Université Catholique de Louvain, IREC – Compétences : médecine du travail ; toxicologie professionnelle et environnementale – Démission en mars 2023

M. Kevin HOGEVEEN – Toxicologue, Anses – Fougères, Toxicologie des Contaminants – Compétences : toxicologie ; génotoxicité ; hépatotoxicité ; toxicologie *in vitro*

Mme Yuriko IWATSUBO – Médecin épidémiologiste à Santé publique France – Compétences : Épidémiologie des risques professionnels

M. Jérôme LANGRAND – Praticien hospitalier, Chef de Service du centre antipoison de Paris, AP-HP Hôpital Fernand-Widal, Centre antipoison de Paris – Compétences : Toxicologie, médecine, toxicologie professionnelle, pathologies environnementales et professionnelles, toxines - A compter de novembre 2023

M. Frédéric LIRUSSI – Professeur des Universités– Praticien Hospitalier (PU-PH) à l'UFR des Sciences de Santé & CHRU de Besançon - Compétences : toxicologie clinique ; toxicologie analytique ; immunité innée ; reprotoxicité – Démission en mars 2023

Mme Gladys MIREY – Directrice de recherche en toxicologie, Responsable de l'équipe Génotoxicité & Signalisation, INRAE UMR TOXALIM – Compétences : Toxicologie cellulaire, génotoxicité, mécanismes d'action, contaminants, modèles d'étude / méthodes alternatives, effets des mélanges - A compter de novembre 2023

M. Luc MULTIGNER – Directeur de recherche, INSERM U1085 - Irset – Compétences : épidémiologie ; perturbateurs endocriniens ; pathologies des fonctions et des organes de la reproduction

Mme Nadia NIKOLOVA-PAVAGEAU – Conseiller médical à l'INRS – Compétences : médecine du travail ; toxicologie médicale ; IBE

Mme Magalie OLIVA-LABADIE – Praticien hospitalier, Chef de Service, CHU de Bordeaux, Hôpital Pellegrin, Centre hospitalier universitaire, Centre Antipoison de Nouvelle Aquitaine – Compétences : Toxicologie, médecine, toxicologie environnementale, toxines - A compter de novembre 2023

M. Benoît OURY – Retraité de l'INRS – Compétences : métrologie atmosphérique ; air des lieux de travail ; évaluation expositions professionnelles

M. Henri SCHROEDER – Maître de Conférence à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lorraine – Département Neurosciences et Biologie Animale et unité INSERM U1256 Nutrition, Génétique et Exposition aux Risques environnementaux - Pharmacien neurobiologiste – Compétences : neurotoxicité ; polluants environnementaux ; comportement animal ; développement cérébral ; exposition périnatale

M. Olivier SORG – Chef de groupe de recherche à l'Université de Genève - Compétences : Docteur es science en biochimie ; toxicologie expérimentale ; dermatotoxicologie

M. Jérôme THIREAU – PhD, Chargé de recherche au CNRS - Compétences : physiologie animale ; électrophysiologie ; biologie cellulaire ; cardiotoxicité – Jusqu'en mars 2023

M. Antoine VILLA – Praticien hospitalier, médecin du travail, Hôpital de la Timone, Marseille – Compétences : Pathologies professionnelles, toxicologie, médecine, expologie-biosurveillance, fibres d'amiante, agents cytotoxiques - A compter de novembre 2023

Mme Maeva WENDREMAIRE – Maître de conférences à l'Université de Bourgogne – Compétences : toxicologie

Les travaux, objets du présent rapport, ont été suivis par le CES suivant.

- CES « Evaluation des risques des milieux aériens » (2020-2024) –2 juin 2022, 3 octobre 2022 et 11 décembre 2023.

### **Présidente**

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de recherche, (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, CESP U1018) – Compétences : épidémiologie, santé respiratoire.

### **Vice-président**

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université Paris Cité) – Compétences : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie.

### **Membres**

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences (Faculté de Santé - Pharmacie - Université Paris Cité) – Compétences : toxicologie environnementale.

M. Fabrice ALLIOT – Ingénieur d'études (Ecole Pratique des Hautes Etudes) – Compétences : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, perturbateurs endocriniens.

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche (Université Gustave Eiffel) – Compétences : transports et pollution de l'air, métrologie et modélisation des émissions des véhicules et du trafic, méthodologies d'évaluation.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignante chercheuse (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, Université de Rennes – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Compétences : toxicologie, évaluation des risques sanitaires, identification des mélanges et modèles de risques associés, perturbateurs endocriniens.

M. Patrick BROCHARD – Professeur émérite (Université de Bordeaux) – Compétences : pneumologie, pathologies professionnelles et environnementales, impact sanitaire des particules inhalées (amiante, silice...).

Mme Fleur DELVA – Praticien hospitalier, médecin de santé publique (Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux) – Compétences : médecine, prévention, reproduction, épidémiologie.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur Émérite des universités (Université de Bretagne Occidentale - Brest) – Compétences : pathologies professionnelles, pneumologie, allergologie, tabacologie.

M. Marc DURIF – Directeur exécutif du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air – Compétences : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, émissions industrielles et anthropiques, caractérisation des expositions, construction de stratégies de surveillances dans l'air dans différents contextes.

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Université de Lille) – Compétences : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

François GAIE-LEVREL – Ingénieur chercheur (Laboratoire national de métrologie et d'essais) – Compétences : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules.

M. Philippe GLORENNEC - Enseignant chercheur (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, Université de Rennes - Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Compétences : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut National de Recherche et de Sécurité) – Compétences : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Marion HULIN - Chargée de projet et d'expertise scientifique (Santé Publique France) – Compétences : épidémiologie, qualité de l'air intérieur, santé environnement, évaluation des expositions.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Compétences : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Compétences : toxicologie, sécurité sanitaire, particules.

Juliette LARBRE - Directrice du Laboratoire Polluants Chimiques (Service Parisien de Santé Environnementale) – Compétences : qualité de l'air intérieur et extérieur, métrologie, santé environnement.

Barbara LE BOT – Professeur des Universités (Ecole des hautes études en santé publique, Université de Rennes, Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Compétences : évaluation des expositions, santé publique, métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air et poussières.

Johanna LEPEULE – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Compétences : pollution de l'air, épidémiologie environnementale, santé périnatale, grossesse, épigénétique, modélisation des expositions.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Compétences : épidémiologie, santé travail, expositions professionnelle et environnementale.

Mme Corinne MANDIN – Responsable du laboratoire d'épidémiologie (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) – Compétences : évaluation des expositions aux substances chimiques et agents physiques et des risques sanitaires associés

Mme Anne OPPLIGER – Responsable de recherche (Unisanté : Centre universitaire de médecine générale et santé publique de Lausanne) – Compétences : santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Directeur Opérationnel (Airparif) – Compétences : métrologie, surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

M. Nhan PHAM-THI – Enseignant chercheur, médecin (Institut de Recherche Biomédicale des Armées, Ecole Polytechnique) – Compétences : allergologie, pneumologie.

Jean-Marc THIBAUDIER – Médecin du travail (Retraité - Mutualité Sociale Agricole des Alpes du Nord) – Compétences : santé travail, médecine, agriculture, produits phytosanitaires, poussières agricoles. Démission le 23 février 2023.

---

## **PARTICIPATION ANSES**

### **Coordination et contribution scientifiques**

Mme Miora ANDRIANJAFIMASY – Coordinatrice d'expertise scientifique – Anses

Mme Marion KEIRSBULCK – Cheffe de l'Unité Evaluation des Risques liés à l'Air – Anses

Mme Aurélie MATHIEU-HUART – Adjointe à la cheffe de l'Unité d'évaluation des valeurs de références et des risques des substances chimiques – Anses

M. Matteo REDAELLI – Coordinateur d'expertise scientifique – Anses

Mme Margaux SANCHEZ – Coordinatrice d'expertise scientifique – Anses

### **Secrétariat administratif**

Mme Sophia SADDOKI – Anses

---

## **CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)**

### **Santé publique France, directions DATA et DSET**

Mise à disposition des nombres et taux de passages journaliers aux urgences pour asthme chez les 0-17 ans (réseau Sursaud®), par département (Martinique non incluse), et des taux de codage des diagnostics médicaux dans les résumés de passages aux urgences, pour l'ensemble des établissements de chaque département, sur 2017-2019.

Mise à disposition des taux moyens journaliers d'hospitalisations en excluant soins de suite et réadaptation (base PMSI-MCO) pour 100 000 habitants en France entière, sur 2017-2019 (taux à établissements non constants) :

- pour bronchopneumopathie chronique obstructive (CIM-10 : J44.9) tous âges et > 65 ans
- pour cardiopathies ischémiques (CIM-10 : I20-I25) tous âges et > 65 ans ;
- pour causes cardiaques (CIM-10 : I00-I52) tous âges et > 65 ans ;
- pour causes cardiovasculaires (incluant AVC) (CIM-10 : I00-I99) tous âges et > 65 ans ;
- pour causes respiratoires (CIM-10 : J00-J99) tous âges et > 65 ans ;
- pour infection aiguë des voies respiratoires inférieures (CIM-10 : J22) > 65 ans ;
- pour insuffisance cardiaque (CIM-10 : I50) tous âges et > 65 ans ;
- pour pneumonie (CIM-10 : J12-J18.9) 0 à 18 ans.

Mise à disposition des taux bruts de mortalité (toutes causes et causes non accidentelles) par classe d'âge (5 ans) pour des zones d'études infra-départementales du Programme de Surveillance Air et Santé, sur 2015-2016.

## SOMMAIRE

<b>Présentation des intervenants</b> .....	<b>3</b>
<b>Sigles et abréviations</b> .....	<b>12</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>14</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>16</b>
<b>1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise</b> .....	<b>20</b>
1.1 Contexte .....	20
1.2 Objet de la saisine .....	21
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation .....	21
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts .....	22
<b>2 Informations générales</b> .....	<b>23</b>
2.1 Préambule .....	23
2.2 Normes et valeurs guides de qualité de l'air ambiant .....	25
2.3 Mesures de la fraction carbonée des particules .....	25
2.3.1 Généralités .....	25
2.3.2 Mesure du carbone élémentaire : méthodes thermo-optiques.....	28
2.3.3 Mesure du carbone suie et de l'absorbance : méthodes par absorption de la lumière d'un filtre chargé en particules.....	28
2.3.4 Relation entre les différentes métriques .....	29
2.4 Sources et exposition au carbone suie.....	31
2.4.1 Sources .....	31
2.4.2 Exposition au carbone suie .....	32
<b>3 Synthèse des effets sur la santé</b> .....	<b>36</b>
3.1 Aspects cinétiques .....	36
3.2 Effets sur la santé .....	37
3.2.1 Santé respiratoire.....	38
3.2.2 Santé cardiovasculaire.....	40
3.2.3 Mortalité toutes causes .....	41
3.2.4 Hospitalisations toutes causes .....	42
3.2.5 Santé neurologique.....	42
3.2.6 Santé périnatale.....	43
3.2.7 Cancer .....	43
3.2.8 Diabète et troubles du métabolisme .....	43
3.2.9 Synthèse des effets sur la santé .....	44
<b>4 Recueil des valeurs toxicologiques de référence existantes</b> .....	<b>47</b>
<b>5 Méthode de construction des VTR par voie inhalée pour le « carbone suie »</b> <b>48</b>	
5.1 Etapes de construction .....	48

5.2	Identification des événements sanitaires d'intérêt .....	49
5.3	Hypothèse de construction.....	50
5.4	Sélection des études clés et des fonctions concentration-risque.....	51
5.4.1	Choix de la littérature épidémiologique .....	51
5.4.2	Recherche bibliographique et sélection des études .....	51
5.4.3	Extraction des données quantitatives décrivant les fonctions concentration-risque	53
5.4.4	Conversion des fonctions concentration-risque en « équivalent-absorbance » .....	55
5.4.5	Analyse et sélection des fonctions concentration-risque d'intérêt.....	55
5.5	Calcul des excès de risque .....	57
5.5.1	Excès de risque vie entière (ELR) (long terme).....	57
5.5.2	Excès de risque journalier (EDR) (court terme).....	60
5.6	Détermination des valeurs candidates et des VTR.....	62
<b>6</b>	<b>Construction de la VTR court terme pour le « carbone suie ».....</b>	<b>63</b>
6.1	Identification des événements de santé d'intérêt.....	63
6.2	Hypothèse de construction : sans seuil de concentration .....	63
6.3	Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque .....	65
6.3.1	Recherche bibliographique et sélection des études .....	65
6.3.2	Extraction des fonctions concentration-risque .....	66
6.3.3	Analyse et sélection des fonctions concentration-risque .....	67
6.4	Calcul des excès de risque journalier (EDR) .....	68
6.4.1	Approche sélectionnée .....	68
6.4.2	Calcul des excès de risque journalier selon différents niveaux de concentrations ..	68
6.5	Détermination des valeurs candidates et de la VTR.....	69
6.6	Spécificités des valeurs candidates et de la VTR court terme .....	72
<b>7</b>	<b>Construction de la VTR long terme pour le « carbone suie » .....</b>	<b>73</b>
7.1	Identification des événements de santé d'intérêt.....	73
7.2	Hypothèse de construction : sans seuil de concentration .....	75
7.3	Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque .....	75
7.3.1	Recherche bibliographique et sélection des études .....	75
7.3.2	Extraction des fonctions concentration-risque .....	75
7.3.3	Analyse et sélection des fonctions concentration-risque .....	78
7.4	Calcul des excès de risque vie entière (ELR).....	78
7.4.1	Approche sélectionnée .....	78
7.4.2	Calcul des excès de risque vie entière selon différents niveaux de concentrations	78
7.5	Détermination des valeurs candidates et de la VTR.....	80
7.6	Spécificités des valeurs candidates et de la VTR long terme .....	84

<b>8</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>86</b>
8.1	VTR court terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	86
8.2	VTR long terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	87
<b>9</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>89</b>
<b>Annexe 1 : Conclusion du travail préliminaire sur la faisabilité de l'élaboration d'une VTR pour le carbone suie des particules de l'air ambiant et mises à jour .....</b>		
		<b>100</b>
<b>Annexe 2 : Liste des appareils conformes pour la surveillance de la fraction carbonée des particules de l'air ambiant .....</b>		
		<b>102</b>
<b>Annexe 3 : Requêtes bibliographiques.....</b>		
		<b>103</b>
<b>Annexe 4 : Tableaux d'extraction des fonctions concentration-risque et d'analyse du niveau d'intérêt de ces fonctions pour dériver la VTR court terme pour le carbone suie .....</b>		
		<b>105</b>
<b>Annexe 5 : Extraction des fonctions concentration-risque et calcul des excès de risque journalier pour les évènements de santé autres que hospitalisations pour causes cardiovasculaires pour dériver la VTR court terme .....</b>		
		<b>143</b>
<b>Annexe 6 : Niveaux de confiance dans les valeurs candidates à la VTR court terme pour le carbone suie .....</b>		
		<b>167</b>
<b>Annexe 7 : Tableaux d'extraction des fonctions concentration-risque et d'analyse du niveau d'intérêt de ces fonctions pour dériver la VTR long terme pour le carbone suie .....</b>		
		<b>174</b>
<b>Annexe 8 : Extraction des fonctions concentration-risque et calcul des excès de risque vie entière pour les évènements de santé autres que la mortalité toutes causes pour dériver la VTR long terme .....</b>		
		<b>200</b>
<b>Annexe 9 : Niveaux de confiance dans les valeurs candidates à la VTR long terme pour le carbone suie .....</b>		
		<b>228</b>

## Sigles et abréviations

Abs	Absorbance ou coefficient d'absorption
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
AVC	Accident vasculaire cérébrale
BC	<i>black carbon</i> (carbone suie)
BPCO	Bronchopneumopathie chronique obstructive
BrC	<i>Brown carbon</i> (carbone brun)
CépiDC	Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès
CES	Comité d'experts spécialisé
CIM	Classification internationale des maladies
Citepa	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
COV	Composé organique volatil
Dae	<u>Diamètre aérodynamique équivalent</u> des particules
eBC	Equivalent carbone suie
EC	<i>Elemental carbon</i> (carbone élémentaire)
EDR	<i>Excess Daily Risk</i> (excès de risque journalier)
ELAPSE (projet)	<i>Effects of Low-level Air Pollution: a Study in Europe</i>
ELR	<i>Excess Lifetime risk</i> (excès de risque vie entière)
EMEP	<i>European Monitoring and Evaluation Programme</i>
EQRS	Evaluation quantitative des risques sanitaires
ERI	Excès de risque individuel
ERU	Excès de risque unitaire
ESCAPE (projet)	<i>European Study of Cohorts for Air Pollution Effects</i>
FI <sub>A-TD</sub>	Facteur d'incertitudes lié à la variabilité inter-espèces, composante toxicodynamique
FI <sub>H</sub>	Facteur d'incertitudes lié à la variabilité interindividuelle
GT	Groupe de travail
HEI	<i>Health Effects Institute</i>
HR	<i>Hazard ratio</i>
IC	Intervalle de confiance (statistique)

ICPE	Etudes d'impact pour des installations classées pour la protection de l'environnement
IMC	Indice de masse corporelle
LAC	<i>Light absorbing carbon</i> (carbone absorbant la lumière)
LCSQA	Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air
LUR	Modèle de type <i>land-use regression</i>
MERA	Observatoire national de Mesure et d'Evaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance
NTP	<i>National Toxicology Program</i>
NRC	<i>National Research Council</i> (États-Unis d'Amérique)
OC	Organic carbon (carbone organique)
OHAT	<i>Office of Health and Translation</i> (division du <i>National Toxicology Program</i> )
OMS	Organisation mondiale de la santé
OR	<i>Odds ratio</i>
ORL	Oto-rhino-laryngologique
PECOTS	Populations, Exposures, Comparators, Outcomes, Timings, Setting
PM	<i>particular matter</i> (matière particulaire)
PM <sub>1,0</sub>	Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur ou égal à 1,0 µm
PM <sub>10</sub>	Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur ou égal à 10 µm
PM <sub>2,5</sub>	Particules de diamètre aérodynamique médian inférieur ou égal à 2,5 µm
PMSI-MCO	Programme de médicalisation des systèmes d'Information relative à l'activité de médecine, chirurgie, obstétrique et odontologie des établissements de santé
RR	Risque relatif
RRx	Risque relatif associé à un incrément de x unités de concentration en BC, EC ou Abs
SCHIF	<i>Shape constrained health impact function</i>
TSP	<i>Total Suspended Particles</i> (particules totales en suspension)
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VTR	Valeur toxicologique de référence

## Liste des tableaux

Tableau 1. Typologie des méthodes de mesures du carbone suie (US EPA 2012).....	27
Tableau 2. Synthèse des effets sur la santé de l'exposition au « carbone suie » de l'air ambiant.....	45
Tableau 3. VTR chronique pour les particules et gaz d'échappement des moteurs Diesel (US EPA 2003) .....	47
Tableau 4. Critères PECOTS définis par le GT pour sa recherche et sélection bibliographique .....	52
Tableau 5. Critères d'évaluations décrivant la nature, la robustesse, la puissance et la validité externe des fonctions concentration-risque.....	56
Tableau 6. Comparaison synthétique des données d'entrées et équations des deux approches typiquement utilisées pour dériver l'ELR .....	59
Tableau 7. Catégories d'effets et indicateurs de santé retenus comme d'intérêt pour construire la VTR court terme pour le « carbone suie », selon les conclusions de OMS (2013), Anses (2019) et US EPA (2019) .....	64
Tableau 8. Description synthétique (par ordre alphabétique) des quatre publications identifiées pour les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires et l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	66
Tableau 9. Synthèse des valeurs candidates à l'élaboration de la VTR court terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	71
Tableau 10. Catégories d'effets et indicateurs de santé retenus comme d'intérêt pour construire la VTR long terme pour le « carbone suie », selon les conclusions de OMS (2013), Anses (2019), US EPA (2019) et HEI (2022) .....	74
Tableau 11. Description synthétique (par ordre alphabétique) des huit publications identifiées pour la mortalité toutes causes non accidentelles et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	76
Tableau 12. Synthèse des valeurs candidates à l'élaboration de la VTR long terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	82
Tableau 13. VTR court terme par voie respiratoire pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	86
Tableau 14. VTR long terme par voie respiratoire pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	87
Tableau 15. Préleveur séquentiel sur filtre pour gravimétrie en différence pour le prélèvement des PM <sub>2,5</sub> en vue de l'analyse du carbone élémentaire (EC), du carbone organique (OC) et des anions (LCSQA 2020b) .....	102
Tableau 16. Analyseur par absorption de la lumière d'un filtre chargé en particules (adapté de LCSQA (2020a)) .....	102
Tableau 17. Description des fonctions concentration-risque (CR) examinant l'exposition à court terme au « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	106
Tableau 18. Analyse du niveau d'intérêt pour dériver une VTR des fonctions concentration-risque examinant l'exposition à court terme « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	117
Tableau 19. Description synthétique (par ordre alphabétique) des sept publications identifiées pour la mortalité toutes causes non accidentelles en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	144
Tableau 20. Description synthétique de la publication identifiée pour les hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes non accidentelles en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	148

Tableau 21. Description synthétique (par ordre alphabétique) des sept publications identifiées pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	149
Tableau 22. Description synthétique de la publication identifiée pour les hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	153
Tableau 23. Description synthétique (par ordre alphabétique) des six publications identifiées pour la mortalité toutes causes respiratoires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	154
Tableau 24. Description synthétique (par ordre alphabétique) des quatre publications identifiées pour les hospitalisations toutes causes respiratoires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	157
Tableau 25. Description synthétique (par ordre alphabétique) des deux publications identifiées pour les visites aux urgences pour asthme en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	160
Tableau 26. Description synthétique des données utilisées pour dériver les valeurs candidates à la VTR court terme pour le « carbone suie » .....	165
Tableau 27. Description des fonctions concentration-risque (CR) examinant l'exposition à long terme au « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	175
Tableau 28. Analyse du niveau d'intérêt pour dériver une VTR des fonctions concentration-risque examinant l'exposition à long terme « carbone suie » des particules de l'air ambiant.....	186
Tableau 29. Description synthétique (par ordre alphabétique) des trois publications identifiées pour l'incidence d'AVC et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	201
Tableau 30. Description synthétique (par ordre alphabétique) des trois publications identifiées pour l'incidence de cardiopathie ischémique et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	203
Tableau 31. Description synthétique de la publication identifiée pour l'incidence d'évènements coronariens aigus et l'exposition à long terme au « carbone suie ».....	204
Tableau 32. Description synthétique de la publication identifiée pour l'incidence d'infarctus du myocarde et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	205
Tableau 33. Description synthétique (par ordre alphabétique) des sept publications identifiées pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	206
Tableau 34. Description synthétique (par ordre alphabétique) des deux publications identifiées pour la mortalité par cardiopathie ischémique et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	209
Tableau 35. Description synthétique (par ordre alphabétique) des deux publications identifiées pour l'incidence de l'asthme chez l'adulte et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	212
Tableau 36. Description synthétique (par ordre alphabétique) des quatre publications identifiées pour l'incidence de l'asthme chez l'enfant et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	214
Tableau 37. Description synthétique de la publication identifiée pour l'incidence de la BPCO et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	217
Tableau 38. Description synthétique (par ordre alphabétique) des six publications identifiées pour la mortalité toutes causes respiratoires et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	218
Tableau 39. Description synthétique de la publication identifiée pour la mortalité de cause BPCO et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	221
Tableau 40. Description synthétique (par ordre alphabétique) des six publications identifiées pour le petit poids de naissance et l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	223
Tableau 41. Description synthétique des données utilisées pour dériver les valeurs candidates à la VTR long terme pour le « carbone suie » .....	226

## Liste des figures

Figure 1. Classification carbonée des particules selon leur capacité d'absorption de la lumière (US EPA 2012).....	26
Figure 2. Revue d'inter comparaisons entre des méthodes optiques et thermo-optiques de mesure du carbone suie (BC) et du carbone élémentaire (EC) (US EPA 2012).....	29
Figure 3. Contributions de différents secteurs aux émissions de carbone suie en France de 1990 à 2020 (Citepa 2022) .....	31
Figure 4. Évolution des émissions de carbone suie en France métropolitaine depuis 1990 (Citepa 2022) .....	32
Figure 5. Concentrations moyennes annuelles de carbone suie mesurées sur une sélection de stations en 2020 (SDES 2021).....	33
Figure 6. Concentrations moyennes annuelles en carbone suie en Île-de-France de 2015 à 2019 (Airparif 2021) .....	33
Figure 7. Concentrations moyennes annuelles en « carbone suie » (exprimées en Absorbance) de 1989 à 2015 modélisées à l'adresse de résidence de 19 348 participants à la cohorte Gazel (Lequy et al. 2021) .....	34
Figure 8. Évolution temporelle des concentrations moyennes journalières en carbone suie provenant du trafic routier (ff) et du chauffage au bois (wb) (AirBreizh 2020).....	34
Figure 9. Évolution des concentrations moyennes journalières en carbone suie (BC) et répartition des sources à Lanslebourg entre septembre 2012 et août 2014 (Favez <i>et al.</i> 2017).....	35
Figure 10. Concentrations moyennes des campagnes de mesures de « carbone suie » ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) selon différentes typologies de sites (Anses 2018).....	35
Figure 11. Démarche de construction des VTR par voie respiratoire pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant .....	49
Figure 12. Diagramme de flux pour la sélection des études examinant l'exposition au « carbone suie » .....	65
Figure 13. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires pour une augmentation de $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	67
Figure 14. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale) d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires en fonction des concentrations moyennes journalières en « carbone suie », exprimées en carbone élémentaire .....	68
Figure 15. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Basagaña <i>et al.</i> (2015).....	69
Figure 16. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de mortalité toutes causes non accidentelles pour une augmentation de $1.10^{-5}$ de l'exposition à long terme au « carbone suie » .....	77
Figure 17. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) de décès toutes causes non accidentelles en fonction des concentrations moyennes annuelle en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance .....	79
Figure 18. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes non accidentelles en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Strak <i>et al.</i> (2021) .....	80

Figure 19. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de la mortalité toutes causes non accidentelles pour une augmentation de $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ de l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	146
Figure 20. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes non accidentelles en fonction concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Achilleos <i>et al.</i> (2017) .....	147
Figure 21. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes non accidentelles chez les plus de 65 ans en fonction des concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Achilleos <i>et al.</i> (2017) .....	147
Figure 22. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de la mortalité toutes causes cardiovasculaires pour une augmentation de $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ de l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	151
Figure 23. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale) de décès toutes causes cardiovasculaires en fonction des concentrations journalières en « carbone suie » (exprimées en carbone élémentaire).....	152
Figure 24. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes cardiovasculaires en fonction des concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Basagaña <i>et al.</i> (2015).....	152
Figure 25. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de la mortalité toutes causes respiratoires pour une augmentation de $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ de l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	155
Figure 26. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes respiratoires en fonction des concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Basagaña <i>et al.</i> (2015) .....	156
Figure 27. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'hospitalisations toutes causes respiratoires pour une augmentation de $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ de l'exposition à court terme au « carbone suie ». .....	158
Figure 28. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale) des hospitalisations pour causes respiratoires en fonction des concentrations journalières en « carbone suie », issue de la fonction de Basagaña <i>et al.</i> (2015) .....	159
Figure 29. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % des visites aux urgences pour asthme (tous âges) pour une augmentation de $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ de l'exposition à court terme au « carbone suie ». .....	161
Figure 30. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % des visites aux urgences pour asthme chez l'enfant et chez l'adulte pour une augmentation de $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ de l'exposition à court terme au « carbone suie » .....	162
Figure 31. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale) des visites aux urgences pour asthme (tous âges) en fonction des concentrations journalières en « carbone suie » (exprimées en carbone élémentaire).....	163
Figure 32. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) des visites aux urgences pour asthme en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Bi <i>et al.</i> (2023) .....	164
Figure 33. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence d'AVC pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance .....	201

Figure 34. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'incidence d'AVC en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Wolf <i>et al.</i> (2021).....	202
Figure 35. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de cardiopathies ischémiques pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance .....	203
Figure 36. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence d'évènements coronariens aigus pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance .....	204
Figure 37. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence d'infarctus du myocarde pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance..	205
Figure 38. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès de causes cardiovasculaires pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance .....	207
Figure 39. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance .....	208
Figure 40. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Yang <i>et al.</i> (2021).....	209
Figure 41. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès pour cause cardiopathie ischémique pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance .....	210
Figure 42. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité de cause cardiopathie ischémique en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance .....	211
Figure 43. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité de cause cardiopathie ischémique en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Strak <i>et al.</i> (2021).....	212
Figure 44. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de l'asthme chez l'adulte pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance..	213
Figure 45. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) d'incidence de l'asthme chez l'adulte en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance .....	213
Figure 46. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'incidence de l'asthme chez l'adulte en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Liu <i>et al.</i> (2021a) .....	214
Figure 47. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de l'asthme chez l'enfant pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance..	215
Figure 48. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) d'incidence de l'asthme chez l'enfant en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance .....	216
Figure 49. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'incidence de l'asthme chez l'enfant en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Gehring <i>et al.</i> (2015) .....	217
Figure 50. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de la BPCO pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance .....	217

Figure 51. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès pour causes respiratoires pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance..	219
Figure 52. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité toutes causes respiratoires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance .....	220
Figure 53. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité toutes causes respiratoires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Strak <i>et al.</i> (2021).....	221
Figure 54. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès pour cause BPCO pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance .....	221
Figure 55. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité de cause BPCO en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Strak <i>et al.</i> (2021) .....	222
Figure 56. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de petit poids de naissance pour une augmentation de $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ de l'exposition à long terme (gestationnelle) en équivalent-absorbance .....	224
Figure 57. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité de cause cardiopathie ischémique de petit poids de naissance en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance .....	225
Figure 58. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) de petit poids de naissance en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Pedersen <i>et al.</i> (2013) .....	225

# 1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

## 1.1 Contexte

A l'issue de l'expertise de l'Anses visant à sélectionner les polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact des infrastructures routières, l'Anses rappelait l'intérêt des évaluations quantitatives des risques sanitaires (EQRS) dans une approche prospective pour estimer les impacts et permettre d'informer la population des risques potentiels sur la santé (Anses 2012). Pour réaliser une telle évaluation des risques en lien avec la source « trafic routier », la prise en compte des particules en suspension (*particulate matter*, PM) apparaissait indispensable, impliquant la nécessité de disposer de valeurs de référence (telle qu'une valeur toxicologique de référence (VTR)). De même, l'utilisation des VTR s'inscrit dans le cadre de la réalisation d'études d'impact pour des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Une VTR est un indice toxicologique qui permet de qualifier ou de quantifier un risque pour la santé humaine. Elle établit le lien entre une exposition à un agent chimique et l'occurrence d'un effet sanitaire indésirable. Les VTR sont spécifiques d'une durée d'exposition (court, moyen et long terme) et d'une voie d'exposition (orale, respiratoire ou cutanée). La construction des VTR diffère en fonction des connaissances ou des hypothèses formulées sur les mécanismes d'action des agents chimiques. Actuellement, l'hypothèse par défaut est de considérer une relation monotone entre la dose d'exposition et l'effet. L'élaboration des VTR suit une approche structurée et exigeante qui implique des évaluations collectives par des groupes de spécialistes.

D'après une enquête par questionnaire en ligne menée en 2018 par l'Anses auprès d'un échantillon non représentatif d'utilisateurs de VTR sur le territoire national (n=26), une majorité de répondants (61,5 %) rapportait le besoin d'une VTR pour les particules de l'air ambiant (Anses 2024).

Par ailleurs, dans ses travaux relatifs à l'identification, la catégorisation et la hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air (Anses 2018), l'Anses catégorisait le carbone suie, un composant de la fraction carbonée des particules de l'air ambiant, comme « polluant prioritaire [...] en vue d'une surveillance » et recommandait l'élaboration d'une VTR ou autre valeur sanitaire de référence. D'autres travaux ont établi des indications fortes d'effets du carbone suie ou carbone élémentaire sur la santé (Anses 2019), tant à court terme qu'à long terme, sur la base des preuves apportées par la littérature épidémiologique et toxicologique récente.

En 2012, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) suggérait que le carbone suie était un meilleur indicateur de la nocivité des particules issues de la combustion (particulièrement le trafic routier) que la masse particulaire indifférenciée (Janssen *et al.* 2012). En particulier, dans les études prenant en compte le carbone suie et la masse particulaire indifférenciée, les associations sont maintenues pour le carbone suie. Ainsi, même s'il pourrait ne pas être un agent causal direct, l'OMS (2021) considère que le carbone suie représente l'un des composés des particules les plus pertinents pour quantifier les effets sur la santé, en particulier cardiovasculaire, et constituerait donc un indicateur supplémentaire précieux pour évaluer les risques sanitaires.

## 1.2 Objet de la saisine

Au vu des éléments précédents, et dans le cadre du programme de travail de la mission d'expertise sur les VTR de l'Anses, et sur avis favorables des comités d'experts spécialisés « Valeurs Sanitaires de Référence » (CES VSR) et « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES AIR), l'Anses s'est autosaisie afin de fixer des VTR pour les particules de l'air ambiant.

**Un rapport d'expertise, publié en 2024, présente la construction des VTR par voie inhalée à court et long terme pour les particules de l'air ambiant (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) (Anses 2024).**

Concernant le « carbone suie » des particules de l'air ambiant, une première étape a été de démontrer la faisabilité de construire des VTR pour des expositions à court et long terme, à partir d'études épidémiologiques. Les conclusions de ce travail sont rapportées en Annexe 1. Elles sont issues d'un état des connaissances sur les effets sanitaires liés à l'exposition au « carbone suie », de l'identification de plusieurs indicateurs de santé présentant une plausibilité de lien de causalité suffisante pour construire une VTR et du recensement de plusieurs fonctions concentration-risque dans la littérature épidémiologique présentant un niveau d'intérêt suffisant pour dériver une VTR.

Les éléments recueillis lors de cette première étape ont servi de base à la construction des VTR pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant. Ils sont identifiés, repris et complétés, le cas échéant, dans le présent rapport.

**Ce rapport décrit la construction des VTR par voie respiratoire à court et long terme pour le « carbone suie » présent dans les particules de l'air ambiant.**

**Sauf mention spécifique, le terme « carbone suie » est utilisé comme un terme générique pour désigner l'ensemble des métriques d'intérêt pour la construction de la VTR : le carbone suie, le carbone élémentaire et le coefficient d'absorption de la lumière – tous trois usuellement examinés dans la littérature épidémiologique. Ces métriques sont décrites en détail dans le chapitre 2.3.**

## 1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé « Valeurs sanitaires de référence » (CES VSR) l'instruction de cette saisine avec l'appui au besoin du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES AIR). Un groupe de travail (GT) a été mandaté pour réaliser ces travaux. Les travaux d'expertise du GT ont été soumis régulièrement aux CES VSR et AIR tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le GT tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres des CES VSR et AIR.

Le présent rapport a été validé par le CES VSR le 15 décembre 2023.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) »

## 1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. La saisine n°2019-SA-0198 fait apparaître un lien d'intérêt induisant un risque potentiel de conflit pour deux experts du CES VSR. De ce fait, ces experts n'ont pas participé à l'examen des travaux découlant de la saisine concernée. Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

## 2 Informations générales

Ce chapitre reprend le préambule rédigé dans le rapport décrivant la construction des VTR pour les particules de l'air ambiant (Anses 2024). Les paragraphes relatifs à la mesure et aux sources de « carbone suie » ont été complétés par rapport à ce qui avait été documenté lors de la phase d'évaluation de la faisabilité. Les paragraphes relatifs à l'exposition au « carbone suie » ont quant à eux été ajoutés. Les éléments ajoutés sont identifiés avec une ★.

### 2.1 Préambule

L'atmosphère qui nous entoure est constituée de composés gazeux et particulaires. On désigne habituellement sous le terme de « particules » l'ensemble des particules solides et/ou liquides qui s'y trouvent en suspension. Le terme « aérosols » désigne, dans le domaine des sciences de l'atmosphère, les particules en suspension dans l'air incluant les gaz les entourant, à l'exception des gouttelettes formées par des cristaux nuageux, de la neige, des brouillards et des pluies, que l'on désigne par le vocable d'hydrométéores.

Un aérosol est caractérisé par divers paramètres : nature chimique, concentration en nombre, concentration en masse, taille des particules, distribution granulométrique, etc. La plupart du temps, cet aérosol est dit polydispersé, c'est-à-dire qu'il contient des particules de taille différente. Cet aérosol est également hétérogène dans sa composition chimique et soumis à un équilibre entre les phases gazeuse et particulaire. Ces propriétés physico-chimiques dépendent notamment des sources primaires d'émissions et des processus de formation des particules, ainsi que de l'évolution physico-chimique des particules après leur formation et leur rejet dans l'air. Les particules présentes dans l'air ambiant sont constituées :

- d'une part de particules dites « primaires », c'est-à-dire de particules directement émises par des sources naturelles (volcanisme, embruns et aérosols marins, érosion éolienne, combustion naturelle de biomasse et feux de forêts, etc.) ou anthropiques (combustions, etc.),
- et d'autre part de particules dites « secondaires », c'est-à-dire de particules formées dans l'air par des processus chimiques complexes, à partir notamment de précurseurs gazeux tels que les oxydes de soufre et d'azote, l'ammoniac, et les composés organiques présents dans l'air.

Le terme de « particules » retenu dans le cadre de ce rapport recouvre des éléments dont les propriétés physiques (taille et granulométrie, morphologie, état de surface, etc.) et la composition chimique sont variables.

Dans l'air ambiant, la taille des particules varie de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de microns. Pour décrire le comportement d'une particule dans l'air, différents paramètres physiques peuvent avoir une importance et pas seulement la taille mais aussi la densité et la forme des particules.

Le diamètre aérodynamique équivalent des particules ( $D_{ae}$ ) permet de prendre en compte l'ensemble de ces caractéristiques et décrit le comportement aérodynamique d'un aérosol. Le  $D_{ae}$  d'une particule  $p$  de masse volumique  $\rho_p$  correspond au diamètre d'une sphère ayant une masse volumique de  $1\ 000\text{ kg.m}^{-3}$  et la même vitesse limite de chute que la particule  $p$ . Dans

l'air, des particules de même Dae vont présenter le même comportement et ce, indépendamment de leurs dimension, forme, masse volumique ou composition chimique.

En outre, à partir d'une taille inférieure à 10 nm, le calcul des surfaces spécifiques par approximation à une sphère de densité donnée est imprécis et il faut considérer le caractère irrégulier/anguleux des surfaces particulaires. En effet, la morphologie des particules est très variable, pouvant aller de particules sphériques agglomérées (cas des particules Diesel ou de combustion) à des formes cristallines organisées (cas des aérosols issus d'embrun marins).

Les conventions actuelles du domaine environnemental concernent la matière particulaire en suspension dans l'air, c'est-à-dire les PM.

Les particules fines, désignées sous le terme de fraction  $PM_{2,5}$  de diamètre aérodynamique médian inférieur à  $2,5 \mu m$ , proviennent notamment de processus de combustion et de phénomènes de coagulation par suite de chocs entre particules plus petites formées par nucléation, ainsi que de condensation de gaz sur les particules.

Les particules grossières, d'un diamètre aérodynamique médian compris entre  $2,5 \mu m$  et  $10 \mu m$ , sont davantage issues de processus mécaniques (remises en suspension, érosions, etc.) et leur composition est en général très similaire à celle du matériau d'origine. On désigne sous le terme de  $PM_{10}$  les particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à  $10 \mu m$ .

Antérieurement, les particules totales en suspension (TSP, *Total Suspended Particles*) désignant l'ensemble des particules en suspension de taille comprise entre  $1 \mu m$  et  $100 \mu m$  étaient mesurées dans le cadre des réseaux de mesure de la qualité de l'air.

Les particules dites ultrafines, dont les plus nombreuses ont un diamètre inférieur à  $100 \text{ nm}$  ( $0,1 \mu m$ ), résultent notamment de processus de combustion et de nucléation (formation de particules solides ou liquides à partir de précurseurs gazeux, en phase homogène ou hétérogène). Leur durée de vie dans l'air est brève car elles disparaissent en grossissant par coagulation entre elles ou avec des particules plus grosses. Ces particules sont également désignées sous le vocable « nanoparticules », sachant que ce dernier reste néanmoins préférentiellement utilisé, par la communauté scientifique, pour désigner les particules de diamètre inférieur à  $100 \text{ nm}$  issues des nanomatériaux manufacturés (Afsset 2010).

D'autres fractions peuvent être considérées dans la littérature. Les particules submicroniques désignent les  $PM_1$  (diamètre aérodynamique médian inférieur à  $1 \mu m$ ). Les particules diesel ont une granulométrie de cet ordre. Ces dernières ont été tout particulièrement étudiées en France puisqu'elles peuvent représenter une très large part des émissions particulaires liées au trafic (Afsset 2010). Ce sont généralement les particules grossières qui constituent la fraction granulométrique la plus importante dans l'air, en masse. Ce sont en revanche les particules ultrafines qui, en nombre, représentent la population de particules la plus importante dans l'atmosphère.

★ En plus de leur granulométrie, les particules de l'air ambiant peuvent être décrites selon leur composition chimique. On peut citer par exemple les composés carbonés, les métaux et les aérosols organiques et inorganiques qui peuvent être formés secondairement. La composition chimique des particules varie dans l'espace, dans le temps, et en fonction de leur fraction granulométrique. Si la plupart des composantes se retrouvent dans les différentes fractions granulométriques, leurs parts relatives y sont variables. On peut noter que les matières carbonées, incluant le « carbone suie », se retrouvent principalement dans les fractions les plus fines ( $PM_{2,5}$  et  $PM_{1,0}$ ).

## 2.2 Normes et valeurs guides de qualité de l'air ambiant

Les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> sont réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air en France et en Europe. Il existe ainsi de nombreuses normes et valeurs guides de qualité de l'air ambiant en lien avec ces particules en masse ; plus de détails les concernant sont disponibles dans le rapport Anses (2024).

★ **Le « carbone suie » dans les particules de l'air ambiant extérieur n'est aujourd'hui pas réglementé pour la surveillance de la qualité de l'air. Aucune valeur guide ou norme analogue à celles existantes pour les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> n'est définie pour le « carbone suie ».**

Néanmoins, le carbone élémentaire dans la fraction PM<sub>2,5</sub> est inclus dans la liste 1.2.e de l'Arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant au titre de la convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. Cette liste implique une surveillance sur des sites ruraux nationaux par l'observatoire national de mesure et d'évaluation en zone rurale de la pollution atmosphérique à longue distance (MERA), composante française du dispositif européen EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*).

De plus, dans sa dernière mise à jour des valeurs guides pour l'air ambiant, l'OMS (2021) formule des recommandations de bonnes pratiques pour la gestion du « carbone suie » dans l'air, à destination des autorités nationales et régionales :

- effectuer des mesures de carbone suie et/ou carbone élémentaire de manière systématique, sans pour autant remplacer ou réduire la surveillance des autres polluants pour lesquels il existe des directives,
- entreprendre la création d'inventaires d'émissions, d'évaluations de l'exposition et de répartition des sources pour le carbone suie et/ou le carbone élémentaire,
- prendre des mesures pour réduire les émissions en carbone suie et/ou carbone élémentaire et, lorsque qu'approprié<sup>1</sup>, élaborer des normes ou objectifs de qualité de l'air ambiant en lien avec ces indicateurs.

## 2.3 Mesures de la fraction carbonée des particules

### 2.3.1 Généralités

La fraction carbonée des particules de l'air ambiant est typiquement divisée en fonction de sa capacité d'absorption de la lumière ou de son caractère plus ou moins réfractaire<sup>2</sup> (Figure 1). Ces métriques ne présentent pas une composition chimique précise mais constituent des mélanges complexes de différents composés, ayant différentes propriétés optiques et physiques. La forme sous laquelle la fraction carbonée est présente dans les particules dépend du processus de formation et de la température.

---

<sup>1</sup> Selon l'OMS (2021), les stratégies de contrôle des émissions du carbone suie doivent tenir compte des conditions locales. Elles peuvent porter sur i) les émissions provenant de la combustion de biomasse et d'autres combustibles polluants pour la cuisine et le chauffage, ii) les émissions des véhicules, diesel notamment, et des engins tout-terrain et/ou iii) les émissions provenant du brûlage des déchets agricoles et communaux et des incendies de forêt.

<sup>2</sup> Le caractère réfractaire correspond à l'inertie de la composante carbonée aux hautes températures.

L'absence de réglementation pour la fraction carbonée des particules joue probablement un rôle dans la multitude de méthodes de mesure et définitions usuellement considérées, sans standardisation à l'heure actuelle.

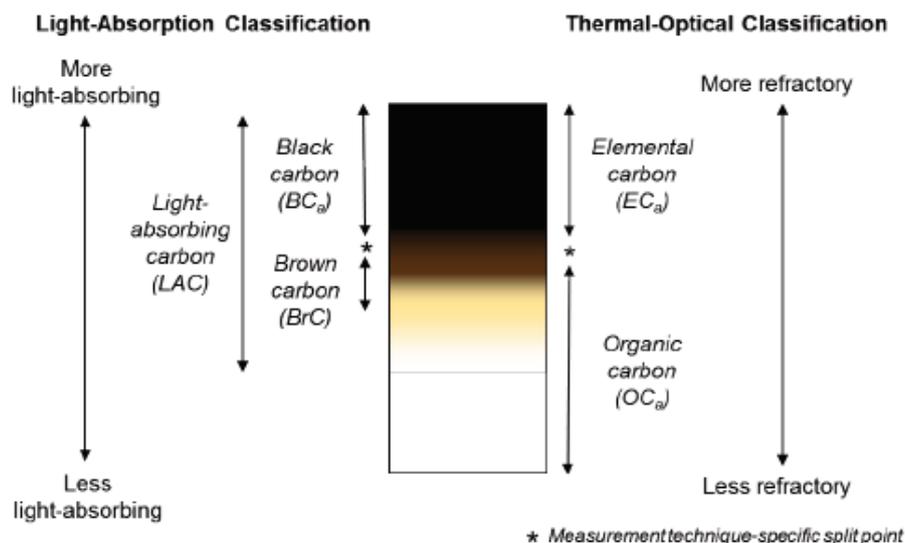


Figure 1. Classification carbonée des particules selon leur capacité d'absorption de la lumière (US EPA 2012)

En se basant sur le rapport de l'US EPA (2012), complété par la revue de la littérature d'Olstrup, Johansson et Forsberg (2016), les différentes composantes de la fraction carbonée des particules de l'air ambiant peuvent ainsi être définies comme suit. ★ Les termes utilisés pour identifier ces différentes fractions d'aérosols carbonés sont dérivées des méthodes de mesure utilisées pour les mesurer (Petzold *et al.* 2013) :

- le **carbone suie (BC, *black carbon* en anglais)** est le composé des PM qui absorbe le plus fortement la lumière. Il est défini comme le composé carboné des PM qui absorbe toutes les longueurs d'onde du rayonnement solaire (US EPA 2012). Il se compose de sphérules très fines dont le diamètre varie de 1 à 5 nm environ qui s'agrègent en particules de taille plus importante de 100 nm à 1 µm environ. Ainsi, le BC est un composé des PM<sub>2,5</sub> de l'air ambiant ;
- le **carbone élémentaire (EC, *elemental carbon* en anglais)**, qui est le composé principal du BC en masse, est le constituant le plus réfractaire de la fraction carbonée des PM. Il s'agit de la forme solide et la plus pure du carbone contenu dans les PM de l'air ambiant, caractérisée par son absence de volatilité et son inertie chimique. Le EC correspondrait à une structure très proche de celle de la fraction BC ;
- le **carbone organique (OC, *organic carbon* en anglais)** est un mélange complexe de composés contenant des liaisons carbone avec d'autres éléments tels que l'hydrogène ou l'oxygène. L'OC possède des propriétés radiatives qui s'inscrivent dans un continuum allant de l'absorption de la lumière à la diffusion de la lumière. Il peut être produit par de la combustion incomplète ou formé par l'oxydation de composés organiques volatils (COV) dans l'atmosphère ;
- la **suie (soot en anglais)**, un complexe de BC principalement et de OC, est un polluant primaire absorbant la lumière et émis par la combustion incomplète de combustible fossile, de biocarburants, et de biomasse. Les **fumées noires (BS, *black smoke* en anglais)** se réfèrent à la plus ancienne méthode standardisée pour mesurer la suie

datant de la fin des années 60. Le terme « **absorbance** » (**Abs**), utilisé dans plusieurs études plus récentes, se réfère au même type de technique de mesure que celle des fumées noires avec généralement un diamètre de coupure à 2,5 µm (**PM<sub>abs</sub>** ou **PM<sub>2,5</sub> Abs**) ;

- le **carbone brun** (BrC, *brown carbon* en anglais) fait référence à une classe de composés du OC qui absorbe les rayonnements ultra-violet et la radiation solaire visible. Le BrC est un produit de la combustion incomplète ;
- le **carbone absorbant la lumière** (LAC, *light absorbing carbon* en anglais) comprend le BC et le BrC.

Parmi les différents types de méthodes, les méthodes thermo-optiques pour la mesure du carbone élémentaire et les méthodes par absorption de la lumière d'un filtre chargé en particules pour la mesure du carbone suie sont les plus courantes (Tableau 1). La mesure automatique par absorption de la lumière pour la mesure du carbone suie est communément utilisée en France notamment dans le cadre du programme CARA (CARActérisation chimique des particules, études des sources) et fait l'objet d'un guide méthodologique du laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA 2020a). D'autres définitions du carbone suie existent dans la littérature en fonction de la discipline scientifique et de l'objectif poursuivi, des propriétés chimique et/ou physique des particules et enfin, des différentes approches de mesure et d'estimation.

Tableau 1. Typologie des méthodes de mesures du carbone suie (US EPA 2012)

<i>Method Type</i>	<i>Method Description</i>	<i>Prevalence of Use</i>
<i>Light absorption/ optical</i>	<i>Filter-based: Light absorption by particles is measured through a filter loaded with particles; BC is quantified using factors that relate light absorption to a mass concentration.</i>	<i>High</i>
	<i>Photoacoustic: Light absorption by particles is measured by heated particles transferring energy to the surrounding air and generating sound waves; BC is quantified using factors that relate light absorption to a mass concentration.</i>	<i>Low</i>
	<i>Incandescence: Incandescent (glowing) particle mass is measured; BC is quantified by calibrating the incandescent signal to laboratory-generated soot.</i>	<i>Low</i>
<i>Isolation of specific carbon fraction</i>	<i>Thermal-Optical: BC is measured as the carbon fraction that resists removal through heating to high temperatures and has a laser correction for carbon that chars during the analysis procedure; BC is quantified as the amount of carbon mass evolved during heating.</i>	<i>High</i>
	<i>Thermal: BC is measured as the carbon fraction that resists removal through heating to high temperatures; BC is quantified as the amount of carbon mass evolved during heating.</i>	<i>Low</i>

En pratique, le BC mesuré correspond à un mélange de EC et de composés organiques absorbant la lumière. Étant donné que les concentrations de EC sont communément utilisées pour représenter le BC, et vice et versa, il est important de caractériser la relation entre le BC et le EC. Au préalable, il convient de noter que les deux mesures ne sont pas toujours entièrement indépendantes, car le facteur de conversion choisi pour estimer le BC est parfois basé sur des expériences établissant une relation entre l'absorption lumineuse et le EC.

L'Annexe 2 décrit les appareils conformes pour la surveillance de la fraction carbonée des particules de l'air ambiant.

★ **Les métriques d'intérêt pour la construction de la VTR incluent le carbone suie, le coefficient d'absorption et le carbone élémentaire - toutes trois incluses dans la fraction carbonée des particules et usuellement considérées dans la littérature épidémiologique récente. Le terme générique « carbone suie » est utilisé pour désigner l'ensemble de ces métriques d'intérêt, sauf mention spécifique.**

### 2.3.2 Mesure du carbone élémentaire : méthodes thermo-optiques

Il existe divers protocoles applicables à l'analyse thermo-optique du carbone élémentaire utilisés par les différents réseaux de mesure du « carbone suie » en France, en Europe et dans le monde, qui se distinguent sur les paliers de températures et le mode de détection optique (par exemple, les protocoles proposés par EUSAAR<sup>3</sup>, IMPROVE<sup>4</sup>, NIOSH<sup>5</sup> 5040 et NIOSH-like quartz). Des études comparatives ont permis d'optimiser plusieurs paramètres des protocoles d'analyse : nombre de plateaux de température auxquels est soumis l'échantillon, température et durée de chaque plateau, durée de la période sous atmosphère inerte, sous atmosphère oxydante. Ces paramètres ont une influence importante sur la concentration mesurée.

En France et en Europe, la norme NF EN 16909 suit le protocole optimisé EUSAAR2 pour la mesure des EC et OC sur filtres PM<sub>2,5</sub> (notamment sur les sites ruraux MERA/EMEP<sup>6</sup> en France) (Brown *et al.* 2017). Cette norme est applicable au mesurage du EC et du OC dans le cadre de l'application de la directive 2008/50/CE. Cette dernière préconise, depuis juin 2010, le mesurage des concentrations en EC et en OC dans la matière particulaire au niveau de sites de fond par les réseaux de surveillance de la qualité de l'air de tous les états membres de l'Union européenne. L'échantillonnage sur filtre doit être effectué conformément à la NF EN 12341: 2014 pour les PM<sub>2,5</sub>. La même méthode d'analyse peut également être utilisée pour des fractions granulométriques inférieures à celle des PM<sub>2,5</sub>. Le domaine d'application prévu par la norme EN 16909 : 2017 comprend les sites dans les zones de fond rurales et urbaines, ainsi que d'autres types de sites, à condition de ne pas dépasser l'étendue de la gamme valide de mesure.

Un document du CEN/TC 264 'Air Quality' *standardisation working group 35* décrit les modes opératoires permettant d'évaluer l'applicabilité de la méthode normalisée EN 16909 (dosage du carbone élémentaire et du carbone organique prélevés sur filtre) pour la fraction PM<sub>10</sub>.

### 2.3.3 Mesure du carbone suie et de l'absorbance : méthodes par absorption de la lumière d'un filtre chargé en particules

Les méthodes par absorption de la lumière d'un filtre chargé en particules pour la mesure du carbone suie incluent des méthodes de mesure en transmission utilisant par exemple un aéthalomètre et des méthodes de mesure en réflectance utilisant par exemple un photomètre.

Selon le LCSQA (2012), les appareils les plus fiables pour la surveillance opérationnelle semblent être l'AE33 (Magee Scientific) concernant les méthodes de mesure en transmission

<sup>3</sup> EUSAAR (projet européen) : *EUropean Supersites for Atmospheric Aerosols Research*

<sup>4</sup> IMPROVE (réseau américain) : *Interagency Monitoring of PROtected Visual Environments*

<sup>5</sup> NIOSH : *National Institute for Occupational Safety and Health*

<sup>6</sup> L'observatoire national de mesure et d'évaluation en zone rurale de la pollution atmosphérique à longue distance (MERA) est la composante française du dispositif européen EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*) de suivi sur le long terme de la pollution atmosphérique dans le cadre de la Convention de Genève sur la pollution transfrontalière longue distance.

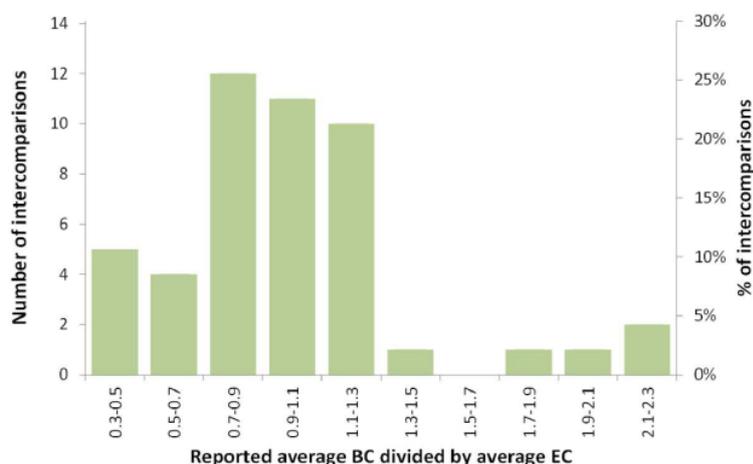
et le MAAP 5012 (Thermo Scientific Inc.) concernant les méthodes de mesure en réflectance. La mesure optique réalisée (coefficient d'absorption en  $m^{-1}$  appelé *absorbance*) peut être convertie en concentration massique en  $\mu g.m^{-3}$  (alors appelée *eBC pour équivalent carbone suie*) à l'aide d'un coefficient d'absorption massique en  $m^2/g$  dont le choix reste discuté au sein de la communauté scientifique<sup>7</sup>.

Etant donné que l'absorption de l'énergie lumineuse par les particules varie en fonction de leur composition chimique et de la longueur d'onde de la source lumineuse, les mesures par absorption de la lumière peuvent intégrer (parfois de manière non négligeable) une fraction de particules organiques ou minérales, reflétant donc un mélange complexe de divers composés organiques plus ou moins volatils, d'hydrocarbures ou de métaux.

## 2.3.4 Relation entre les différentes métriques

### 2.3.4.1 Corrélations

Dans sa revue d'études publiées entre 2000 et 2010, portant sur une large variété d'environnements allant des régions éloignées de l'Arctique jusqu'aux villes urbaines, l'US EPA (2012) a rapporté une forte et constante corrélation entre les métriques BC et EC ( $\rho$  moyen =  $0,86 \pm 0,11$ ) ainsi que des ratios eBC/EC généralement proches de 1 (de 0,7 à 1,3 pour la majorité des environnements considérés) (Figure 2). ★ Petzold *et al.* (2013) concluaient que les concentrations dérivées des méthodes chimiques et des méthodes optiques peuvent différer considérablement jusqu'à un facteur 7 mais qu'elles sont généralement corrélées de manière statistiquement significative.



**Figure 2. Revue d'inter comparaisons entre des méthodes optiques et thermo-optiques de mesure du carbone suie (BC) et du carbone élémentaire (EC) (US EPA 2012)**

En France, les données confirment globalement une bonne corrélation entre les concentrations journalières de BC et d'EC sur les sites urbains, à l'exception de situations d'épisodes de pollution et/ou sur les sites ruraux (LCSQA 2019). Ces données sont issues de campagnes de mesures réalisées entre 2013 et 2016 avec la méthode optique AE33 pour le carbone suie et la méthode thermo-optique suivant le protocole EUSAAR2 pour le carbone élémentaire. Pour la région parisienne, le ratio de EC et BC se situait généralement à 1,56

<sup>7</sup> Le MAAP donne une concentration massique de carbone absorbant la lumière. Lors de comparaisons instrumentales avec une méthode de référence thermique, les auteurs ont dérivé un coefficient d'absorption massique de  $6,6 m^2/g$  pour les aérosols ruraux et urbains, qui est utilisé pour la conversion de l'absorption lumineuse en concentration massique de « suie ».

d'après les données du SIRTA<sup>8</sup>. Outre les épisodes de pollution, des différences saisonnières ont également été mises en évidence, avec des ratios plus élevés et plus variables pendant les mois chauds (US EPA 2012).

Olstrup, Johansson et Forsberg (2016) mentionnent également plusieurs études rapportant une forte corrélation entre les différentes métriques sur le court et le long terme (BC, EC et Abs).

#### 2.3.4.2 Conversions ★

Les fortes corrélations observées soutiennent le développement d'équations de conversion entre métriques. De telles conversions sont nécessaires pour permettre les comparaisons des risques sanitaires obtenus dans des études épidémiologiques utilisant différentes métriques pour décrire la fraction carbonée des particules.

Ainsi, le HEI (2022) a converti les risques associés à des concentrations annuelles en carbone suie et en absorbance en risques « équivalents carbone élémentaire » afin de mener à bien ses méta-analyses. Il faut noter que cette conversion ajoute une incertitude statistique supplémentaire qui n'est pas considérée dans les intervalles de confiance. Les équations de conversion utilisées sont les suivantes, valables uniquement pour des concentrations moyennes annuelles (i.e. des risques liés à une exposition à long terme) :

$$\begin{aligned} \text{équivalent EC } (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) &= 1,25 \times \text{BC } (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) \\ \text{équivalent EC } (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) &= 1,10 \times \text{Abs } (.10^{-5} \text{ m}^{-1}) \end{aligned}$$

Les équations retenues par le HEI se basent sur la littérature scientifique. Janssen et al. (2011) ont considéré qu'une concentration annuelle de 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de fumée noire (équivalente à 1 unité d'absorbance<sup>9</sup>) correspondait à 1,1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de carbone élémentaire. Babich et al. (2000) ont quant à eux observé des valeurs de carbone élémentaire mesuré sur filtre environ 24 % supérieures à celles du carbone suie, mesuré par aéthalomètre. Watson et Chow (2002) ont confirmé que les concentrations de carbone élémentaire étaient 20 à 25 % supérieures à celles du carbone suie. D'autres équations ont par ailleurs été rapportées par Olstrup, Johansson et Forsberg (2016).

#### 2.3.4.3 Conclusions ★

En conclusion, le regroupement du carbone suie, du carbone élémentaire et de l'absorbance dans les présents travaux est une limite pour la définition de l'indicateur d'exposition. Ce regroupement est cependant soutenu par la volonté internationale de standardisation des mesures et les corrélations connues entre les niveaux ambiants de ces trois composés.

Les différentes métriques (Abs, BC et EC) sont souvent fortement corrélées, mais les relations quantitatives peuvent varier considérablement en fonction du moment où elles ont été réalisées, de l'emplacement, de la période de l'année, etc., en raison des différentes caractéristiques physiques et chimiques qui influent sur les propriétés optiques des aérosols (Olstrup, Johansson et Forsberg 2016). Le rapport entre carbone suie et carbone élémentaire ainsi que la cohérence de leur relation dépendent du mélange d'aérosols et/ou de la méthode utilisée, tant pour la mesure que pour le post-traitement des données.

<sup>8</sup> SIRTA : site instrumental de recherche par télédétection atmosphérique.

<sup>9</sup> Cette équivalence a été empiriquement observée par Roorda-Knape *et al.* (1998).

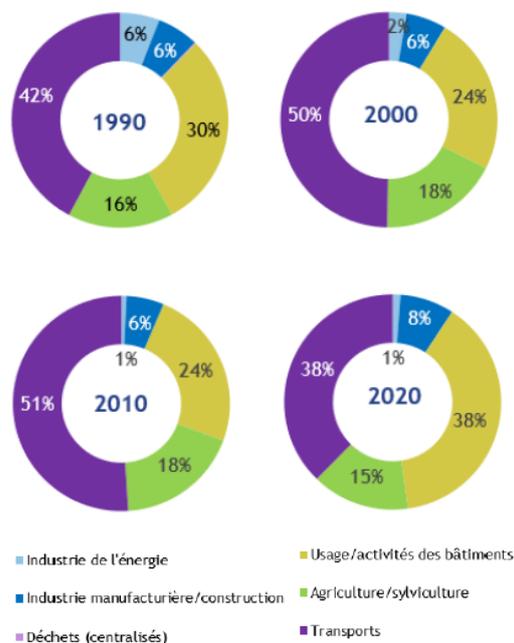
**Sur le long terme**, la corrélation entre carbone suie et carbone élémentaire est variable et dépend de nombreux facteurs mais l'un n'en reste pas moins un bon indicateur de l'autre et vice versa. Des facteurs de conversion existent et peuvent être utilisés pour faciliter les comparaisons des risques sanitaires obtenus dans des études épidémiologiques utilisant différentes métriques pour décrire la fraction carbonée des particules.

**Sur le court terme**, une telle conversion n'est *a priori* pas recommandée en raison de l'importance de l'influence des contextes spatio-temporels locaux (épisodes de pollution et saisons) dans les variations des concentrations journalières, de leurs compositions et de leurs corrélations.

## 2.4 Sources et exposition au carbone suie

### 2.4.1 Sources

★ Les sources de carbone suie dans l'air ambiant extérieur sont multiples, d'origine naturelle et anthropique (en lien avec le processus de combustion incomplète des combustibles fossiles, biomasse incluant bois, végétation et bio-fiouls). Lorsqu'il est mesuré dans l'atmosphère, le carbone suie est toujours associé à d'autres substances issues de la combustion de carburants carbonés, tels que les composés organiques (Janssen *et al.* 2012). Par conséquent, le carbone suie est un traceur universel d'un mélange variable de particules provenant d'une grande variété de sources de combustion. Par ailleurs, les émissions primaires de carbone sont l'un des principaux contributeurs à la formation d'aérosols organiques secondaires (une composante importante des PM<sub>2,5</sub>).



**Figure 3. Contributions de différents secteurs aux émissions de carbone suie en France de 1990 à 2020 (Citepa 2022)**

Les émissions en France sont renseignées dans le cadre du bilan national du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa 2022). En 2020, les secteurs des transports (principalement routier) et de l'usage et activités des bâtiments (en lien avec le chauffage au bois) contribuaient à 76 % des émissions totales nationales de carbone suie (38 % chacun) (Figure 3). S'ensuivaient les contributions des secteurs de l'agriculture et sylviculture (15 %), de l'industrie manufacturière et construction (8 %) et de l'industrie de l'énergie (1 %). Ces estimations tiennent uniquement compte des feux de forêt comme sources naturelles ; de plus, ces estimations n'incluent pas la formation d'aérosols secondaires.

★ Les sources d'émissions ne sont pas homogènes sur l'ensemble du territoire. En zone urbaine, le carbone élémentaire représente de l'ordre de 10 % (en situation de fond) et 25 % (en proximité du trafic) des concentrations annuelles de PM<sub>2,5</sub>, mais la contribution de la combustion de biomasse peut atteindre 43 % en épisode hivernal (Airparif et LSCE 2011).

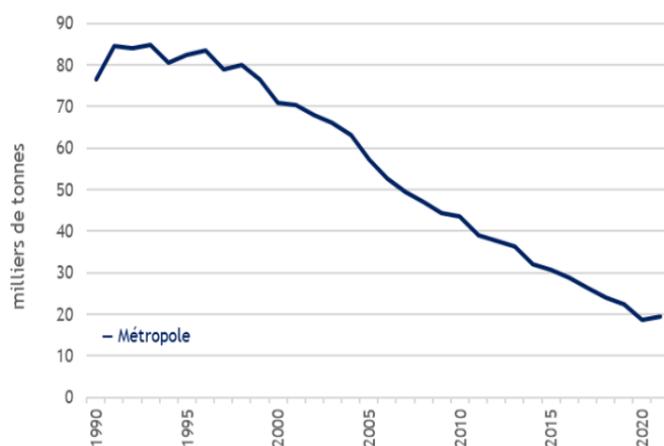


Figure 4. Évolution des émissions de carbone suie en France métropolitaine depuis 1990 (Citepa 2022)

★ Les émissions de carbone suie ont fortement diminué entre 1990 et 2020 pour les mêmes raisons que les PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> (Figure 4). Les émissions de l'ensemble des transports sur la dernière décennie ont essentiellement diminué grâce au renouvellement du parc des véhicules routiers, l'évolution de la répartition entre les différentes motorisations et la mise en place de normes d'émissions de plus en plus strictes (Citepa 2022).

## 2.4.2 Exposition au carbone suie

### 2.4.2.1 Estimation de l'exposition des populations

L'exposition individuelle aux particules de l'air ambiant (et à sa fraction carbonée) est conditionnée par les sources d'émissions et les niveaux de concentration, elles-mêmes influencées par les conditions météorologiques, la topographie des sols, les caractéristiques du bâti, ainsi que par le budget espace-temps des individus. L'évaluation de l'exposition des individus à la pollution atmosphérique peut se faire à l'échelle régionale, locale ou individuelle. Cette dernière peut être évaluée selon différentes approches : par prélèvement individuel, par mesure ambiante ou par modélisation des concentrations environnementales – ces deux dernières étant de loin les plus fréquentes dans les études épidémiologiques.

Pour obtenir une évaluation de l'exposition à l'échelle individuelle, des approches par modélisation sont communément utilisées. Plusieurs modèles sont disponibles incluant des modèles d'interpolation, d'occupation des sols (*land-use regression*, LUR), de dispersion, d'émissions météorologiques, satellitaires ou hybrides. Ces modèles ont été développés pour appréhender la variabilité de l'exposition au niveau spatial, attendue sur des petites zones géographiques.

★ Il existe des outils de modélisation des concentrations atmosphériques de la fraction carbonée des particules ; ces modèles sont surtout utilisés à des fins de recherche scientifique. Le module « aerosols » du modèle de chimie-transport CHIMERE fournit des concentrations horaires modélisées de carbone élémentaire et carbone organique (Bessagnet *et al.* 2004; Bessagnet *et al.* 2009). Dans le cadre du projet européen ELAPSE (*Effects of Low-level Air Pollution : a Study in Europe*), des modèles hybrides (intégrant occupation des sols et observations par satellite) ont été développés pour estimer les concentrations annuelles ambiantes de plusieurs polluants, dont le carbone suie, à une échelle spatiale fine (100 mètres) pour l'année 2010 (Chen *et al.* 2020; de Hoogh *et al.* 2018b).

★ La variabilité spatiale des concentrations en carbone suie est plus importante que celle des concentrations en PM<sub>2,5</sub> (Janssen et al. 2012). Néanmoins, les mesures ou modélisations ambiantes sont supposées refléter l'exposition des individus et ce, avec une précision similaire à celles des PM<sub>2,5</sub>.

#### 2.4.2.2 Concentrations en « carbone suie » ★

##### Sur le long terme (i.e. moyennes annuelles)

La surveillance du carbone suie dans l'air extérieur est assurée sur le territoire métropolitain sur plusieurs sites urbains et ruraux. Le bilan de la qualité de l'air extérieur en 2020 en France rapporte des concentrations annuelles mesurées de 0,5 à 1,6 µg.m<sup>-3</sup> sur plusieurs stations de fond urbain, atteignant presque 4,5 µg.m<sup>-3</sup> à proximité du trafic routier (Figure 5) (SDES 2021). Cette variabilité spatiale s'observe sur plusieurs sites de mesure en Île-de-France, avec des *maxima* de concentrations en bordure de l'autoroute A1 (Figure 6) (Airparif 2021). Il est important de noter qu'en 2020, les mesures exceptionnelles de limitation des déplacements et de l'activité économique liées à la gestion de la pandémie de Covid-19, ont conduit à une baisse importante des concentrations mesurées, particulièrement à proximité du trafic routier.

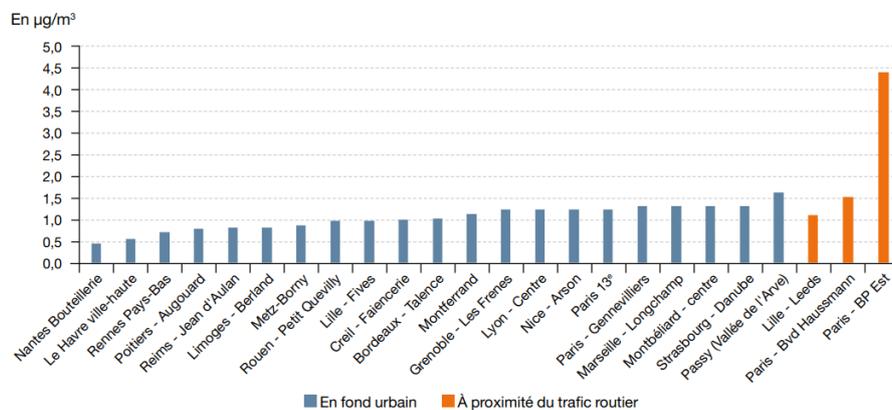


Figure 5. Concentrations moyennes annuelles de carbone suie mesurées sur une sélection de stations en 2020 (SDES 2021)

Une évolution à la baisse des concentrations en carbone suie est constatée ces dernières années. Entre 2015 et 2019, la baisse des concentrations est estimée entre -20 et -40 % selon les sites en Île-de-France (Figure 6), en lien avec la baisse des émissions (cf. chapitre 2.4.1) (Airparif 2021).

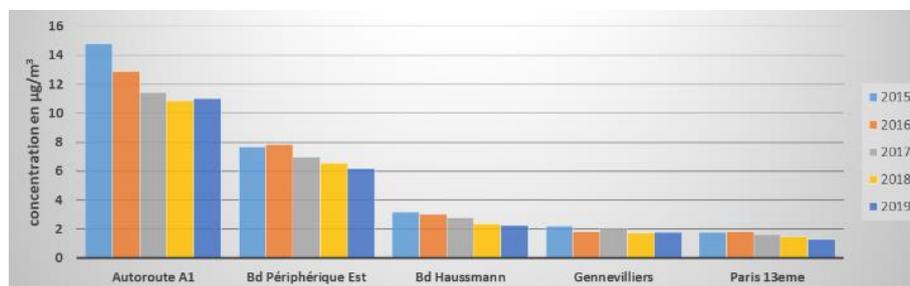
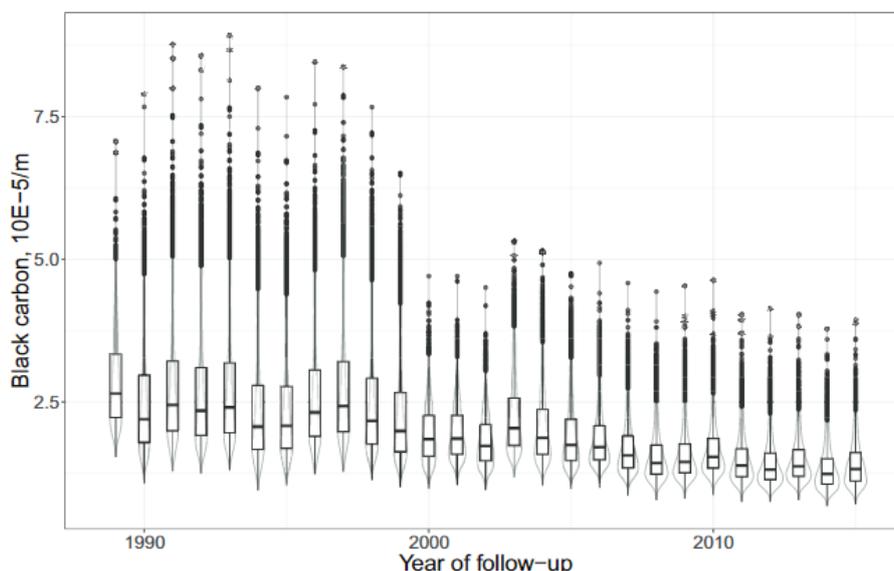


Figure 6. Concentrations moyennes annuelles en carbone suie en Île-de-France de 2015 à 2019 (Airparif 2021)

Cette baisse des concentrations mesurées se traduit dans les modélisations estimant l'exposition des participants de la cohorte Gazel en France (Figure 7) (Lequy *et al.* 2021). L'estimation montre des concentrations annuelles moyennes (d'absorbance) comprises entre  $0,7 \cdot 10^{-5}$  et  $8,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , avec une diminution au fil du temps<sup>10</sup>. Il est à noter que les incertitudes associées aux modélisations passées (< 2010) sont grandes (de Hoogh *et al.* 2018a).



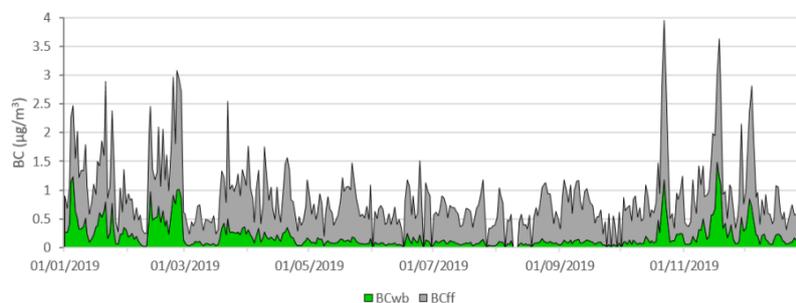
Les boîtes à moustaches indiquent le minimum, le 25<sup>ème</sup> percentile, la médiane, le 75<sup>ème</sup> percentile, les valeurs aberrantes (supérieures au 75<sup>ème</sup> percentile plus  $1,5 \cdot \text{écart interquartile}$ ) et le maximum des concentrations.

**Figure 7. Concentrations moyennes annuelles en « carbone suie » (exprimées en Absorbance) de 1989 à 2015 modélisées à l'adresse de résidence de 19 348 participants à la cohorte Gazel (Lequy *et al.* 2021)**

#### Sur le court terme (i.e. moyennes journalières)

Les concentrations moyennes journalières en carbone suie peuvent être très variables en fonction des conditions météorologiques et des localisations géographiques incluant différentes sources parfois saisonnières (EEA 2013; Trechera *et al.* 2023).

Comme illustré par une station de fond urbain à Rennes en 2019, la contribution du trafic routier aux concentrations moyennes journalières (approchée par BCff sur la Figure 8) reste stable au cours de l'année même quand le chauffage résidentiel au bois (wb) impacte fortement les concentrations en hiver (Figure 8) (AirBreizh 2020). Le maximum journalier de carbone suie (ff + wd) atteint  $3,9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  en automne.

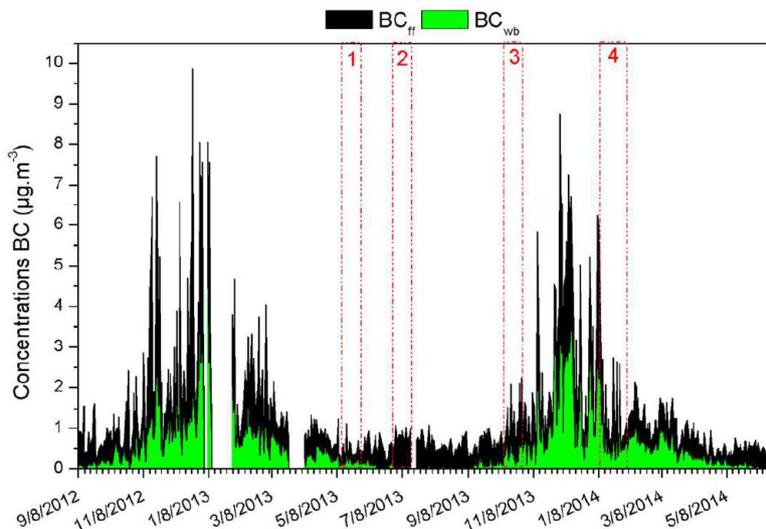


BCff : carbone suie issu de la combustion de combustibles fossiles ; BCwb : carbone suie issu de la combustion de bois.

**Figure 8. Évolution temporelle des concentrations moyennes journalières en carbone suie provenant du trafic routier (ff) et du chauffage au bois (wb) (AirBreizh 2020)**

<sup>10</sup> En utilisant les facteurs de conversion décrits dans le chapitre 2.3.4.2, ces concentrations en absorbance peuvent être exprimées en équivalent-EC telles que  $0,77 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  et  $9,79 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .

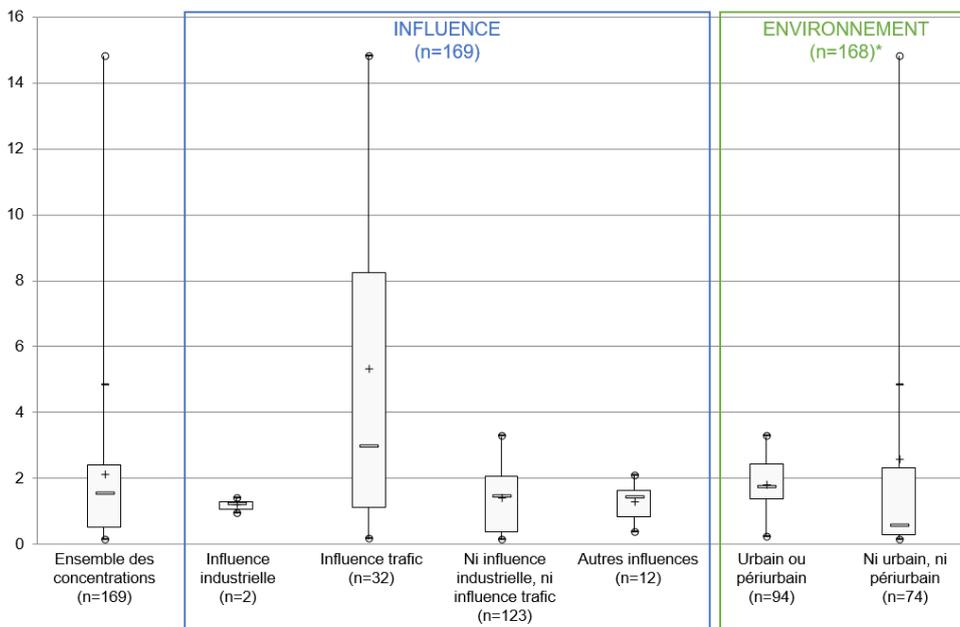
Les pics observés à Lanslebourg en vallée Alpine, entre 2012 et 2014, illustrent également l'effet combiné des sources saisonnières (ici, chauffage au bois) et des conditions météorologiques sur les concentrations journalières en BC (Figure 9). Les valeurs observées étaient similaires à ce qui peut s'observer dans de grandes métropoles et/ou à proximité du trafic routier, s'expliquant en partie par des épisodes d'inversion thermique qui ont favorisé l'accumulation des polluants (Favez et al. 2017).



BCfi : carbone suie issu de la combustion de combustibles fossiles ; BCwb : carbone suie issu de la combustion de bois.

Figure 9. Évolution des concentrations moyennes journalières en carbone suie (BC) et répartition des sources à Lanslebourg entre septembre 2012 et août 2014 (Favez et al. 2017)

Enfin, les données quantitatives collectées auprès d'associations agréées de surveillance de la qualité de l'air et de laboratoires de recherche français dans le cadre de l'expertise de l'Anses (2018) montrent des concentrations moyennes journalières mesurées entre 2012 et 2016 pouvant aller jusque 15 µg.m<sup>-3</sup> à proximité du trafic routier (Figure 10).



Entre parenthèses, le nombre de valeurs disponibles pour cette typologie. \*Une valeur de concentration ne disposait pas d'information sur son environnement (donnée manquante).

Figure 10. Concentrations moyennes des campagnes de mesures de « carbone suie » (µg.m<sup>-3</sup>) selon différentes typologies de sites (Anses 2018)

## 3 Synthèse des effets sur la santé

Ce chapitre synthétise les éléments relatifs à la cinétique des particules en masse et les complète en précisant certains aspects mécanistiques spécifiques au « carbone suie », ces derniers n'ayant pas été documentés lors de l'étape de détermination de la faisabilité de construction des VTR. Ce chapitre met également à jour la littérature socle épidémiologique, pour compléter les éléments relatifs aux effets sur la santé du carbone suie, du carbone élémentaire et de l'absorbance. Les éléments ajoutés en comparaison du rapport Anses (2024) sont identifiés avec une ★.

### 3.1 Aspects cinétiques

★ Aucun élément spécifique à la cinétique de la fraction carbonée des particules n'a été trouvé dans la littérature. Le carbone suie et le carbone élémentaire étant des composés des particules inhalées, les aspects cinétiques relatifs au dépôt, à la translocation, à la clairance et à la rétention des PM<sub>2,5</sub> sont *a priori* similaires à ceux du carbone suie des particules.

Les éléments ci-dessous synthétisent les connaissances relatives à la cinétique des particules en masse dans les voies aériennes supérieures et inférieures et ce, en fonction de différents facteurs : caractéristiques des particules, différences entre espèces et, au sein de l'espèce humaine, rôle de certains déterminants. L'intégralité de ces connaissances sont disponibles dans le rapport décrivant la construction de VTR pour les particules de l'air ambiant (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) (Anses 2024).

Synthétiquement, lors de l'inhalation, une première sélection granulométrique s'opère par les voies aériennes supérieures, pour ne laisser pénétrer que la fraction des particules décrite comme « inhalable », correspondant à l'une des définitions conventionnelles en santé travail (Afnor 1993, 1996). Les PM<sub>10</sub> peuvent passer la barrière du nez et, globalement, seules les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 100 µm parviennent jusqu'au larynx.

Après avoir été inhalées, les particules vont se distribuer au sein du tractus respiratoire selon leur taille et la gravité, entre les voies aériennes/respiratoires supérieures (nez, pharynx, bouche et larynx), les voies aériennes/respiratoires inférieures, intrathoraciques (trachée, bronches souches et lobaires et bronchioles) et les alvéoles ou sacs alvéolaires (structure du parenchyme pulmonaire et lieu des échanges, essentiellement gazeux, entre l'air inspiré et la circulation sanguine).

Une fois inhalées et distribuées dans le système respiratoire, les particules peuvent être exhalées ou déposées dans les voies aériennes supérieures, inférieures ou les alvéoles pulmonaires sous l'influence de mécanismes de diffusion, d'impaction et de sédimentation (ces deux derniers mécanismes augmentant avec le diamètre des particules). L'importance de ce dépôt dépend principalement de la taille des particules, mais également d'autres facteurs :

- les particules inférieures à 0,1 µm et supérieures à 1 µm sont majoritairement déposées dans le tractus respiratoire humain, respectivement au niveau trachéo-bronchique par diffusion et au niveau nasal par impaction ;

- les autres facteurs influençant le dépôt total dans les voies respiratoires incluent : le niveau d'activité physique, l'âge, le sexe, l'indice de masse corporelle, les pathologies affectant le tractus respiratoire ou la répartition oro-nasale de la respiration.

Après leur dépôt, les particules les moins solubles peuvent subir des phénomènes de clairance ou de translocation.

La clairance désigne le processus par lequel les particules sont éliminées du tractus respiratoire, par action combinée des cellules ciliées et du mucus (clairance mucociliaire) ou par phagocytose.

- Les particules déposées dans les fosses nasales, la bouche ou le pharynx, sont majoritairement dégluties et rejoignent le tractus digestif, soit directement, soit après une phase de clairance mucociliaire.
- Les particules déposées dans les voies aériennes inférieures subissent une clairance mucociliaire, conduisant les particules à « remonter » les voies respiratoires, à passer par le pharynx et finalement à être dégluties.
- Au sein des alvéoles, les particules sont éliminées par phagocytose dans les macrophages, migrent vers les bronchioles puis sont prises en charge par le système mucociliaire. La clairance depuis la région alvéolaire est dépendante de la phagocytose.
- La clairance des particules déposées dans le tractus respiratoire est influencée par l'âge, les pathologies et infections respiratoires et le statut tabagique.

La translocation désigne le passage libre des particules à travers les membranes des cellules du tractus respiratoire vers d'autres organes ou systèmes. La translocation représente des conditions de passage transmembranaire direct (i.e. sans phagocytose) de particules insolubles déposées dans le tractus respiratoire vers d'autres systèmes ou organes. Ce phénomène est encore imparfaitement compris. La translocation, peut survenir i) depuis la muqueuse olfactive et respiratoire jusque dans des régions cérébrales *via* les neurones sensoriels du bulbe olfactif, en contact direct avec l'environnement et le cerveau ; ii) depuis les voies respiratoires inférieures et les alvéoles pulmonaires par passage direct dans le tissu interstitiel, dans la circulation sanguine ou dans le système lymphatique ; iii) depuis la voie digestive consécutive à la déglutition, probablement moins contributive à l'exposition systémique que la translocation directe depuis les voies respiratoires ; iv) une fois absorbées dans l'organisme, les particules peuvent se transloquer depuis le compartiment sanguin vers le fœtus, pouvant conduire à une exposition et des effets *in utero*.

L'extrapolation quantitative à l'humain des résultats observés dans les études d'expérimentation chez l'animal sur des aérosols est complexe et incertaine compte tenu des différences physiologiques et anatomiques entre les rongeurs et les primates, bien que ces différences puissent être partiellement comblées par des modèles dosimétriques. Ces modèles dosimétriques restent cependant encore peu appliqués à l'étude des particules de l'air ambiant et n'intègrent pas les aspects toxicodynamiques.

## 3.2 Effets sur la santé

Ce chapitre synthétise l'état des connaissances relatives aux effets sanitaires du « carbone suie » des particules de l'air ambiant extérieur. Il est basé sur les revues de la littérature scientifique réalisées par l'US EPA (2019), l'Anses (2019) et le HEI (2022). Ces deux dernières

ont également évalué le poids des preuves sur les effets sur la santé de l'exposition au « carbone suie » (exprimée en BC, EC ou Abs).

Le rapport de l'US EPA (2019) a décrit les effets des composés des PM<sub>2,5</sub> dont le « carbone suie » sur la base des seules données épidémiologiques et uniquement en comparaison des effets des PM<sub>2,5</sub>. L'US EPA ne concluait pas à un niveau de preuve des effets sur la santé du « carbone suie ».

Le rapport de l'Anses (2019) relatif aux effets sanitaires associés à la composition des particules a conclu sur un niveau d'indication d'effet sanitaire<sup>11</sup> pour plusieurs composés, dont la fraction carbonée, à partir d'une démarche d'évaluation du poids des preuves épidémiologiques et d'expérimentations animales, publiées après la revue REVIHAAP de l'OMS (2013).

★ Le HEI (2022) a évalué de manière systématique les études épidémiologiques examinant l'association entre l'exposition à long terme à la pollution issue du trafic routier et la santé. Des méta-analyses ont été réalisées lorsque les données le permettaient. Le HEI a conclu sur des niveaux de confiance dans la qualité des preuves épidémiologiques pour soutenir la présence d'une association entre l'exposition à long terme à la pollution atmosphérique, incluant la métrique « équivalent carbone élémentaire » (équivalent EC), et des effets sur la santé. Une vue d'ensemble des mécanismes biologiques sous-jacents des effets observés dans les études épidémiologiques a également été proposée par le HEI (2022). Il est à noter que seuls des éléments qualitatifs, sans évaluation du poids des preuves, ont été rapportés en lien avec l'exposition à court terme.

★ Les conclusions de ces trois rapports pour les effets sanitaires du « carbone suie », par catégorie d'effet sanitaire (par exemple, santé respiratoire) et durée d'exposition (long terme<sup>12</sup> et court terme<sup>13</sup>) sont synthétisées dans les chapitres suivants (de 3.2.1 à 3.2.8). Un tableau récapitulatif est proposé au chapitre 3.2.9.

### 3.2.1 Santé respiratoire

#### 3.2.1.1 Court terme

L'US EPA (2019) rapportait des associations concordantes dans les études examinant l'exposition à court terme à EC ou BC et la santé respiratoire, particulièrement avec les consultations aux urgences, les symptômes d'asthme et l'inflammation pulmonaire chez les enfants. Selon l'US EPA, il est cependant difficile de différencier les effets du BC de ceux des PM<sub>2,5</sub>, car les études prenant en compte ces deux polluants pour essayer de différencier leurs effets étaient discordantes.

L'Anses (2019) concluait à une indication « forte » d'effets à court terme de l'exposition au BC sur la santé respiratoire. Cette conclusion était basée principalement sur les résultats d'études montrant des effets de BC ou EC sur les hospitalisations toutes causes respiratoires et, dans une moindre mesure, sur la mortalité de cause respiratoire. Des indications plus faibles étaient

---

<sup>11</sup> Un niveau d'indication sanitaire représente l'existence plus ou moins avérée d'une association (ou absence d'association) entre une exposition et un événement de santé. Les niveaux d'indication « fort », « modéré » et « faible » traduisent directement l'existence plus ou moins avérée d'une association selon les preuves disponibles. Le niveau d'indication « inadéquat » traduit une confiance trop faible dans les preuves pour soutenir une association.

<sup>12</sup> Expositions à long terme : une à plusieurs années. Les expositions pendant la grossesse (grossesse entière ou par trimestre) sont ici considérées comme une exposition à long terme.

<sup>13</sup> Expositions à court terme : un à plusieurs jours.

rapportées pour l'asthme (symptômes, traitements, hospitalisations) et les sifflements ainsi que pour des marqueurs d'inflammation.

### 3.2.1.2 Long terme

L'US EPA (2019) rapportait la mise en évidence dans la littérature d'une association entre l'exposition à long terme à EC et la santé respiratoire, en particulier pour l'asthme chez les enfants. Les résultats sont cependant moins robustes pour les composants pris individuellement que pour les PM<sub>2,5</sub> totaux, car il est difficile de séparer leurs effets de celui des PM<sub>2,5</sub>.

L'Anses (2019) concluait à une indication « modérée » d'effets de l'exposition à long terme au BC sur la santé respiratoire. Cette conclusion s'appuyait sur les résultats des études examinant les bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO) et les bronchites chroniques. Des indications plus faibles étaient rapportées sur la mortalité respiratoire, les infections respiratoires et oto-rhino-laryngologiques (ORL) chez les enfants, la fonction pulmonaire et les marqueurs d'inflammation.

★ Pour la santé respiratoire de l'enfant, le HEI (2022) rapportait des niveaux de confiance « faibles » (incidence de l'asthme chez l'enfant et infections aiguës des voies respiratoires basses) et « très faibles » (prévalence et asthme actuel chez l'enfant) dans les preuves disponibles. Cinq études étaient incluses dans la méta-analyse pour l'incidence de l'asthme, amenant à une estimation de risque positive mais non significative. Des conclusions similaires étaient tirées pour la prévalence de l'asthme actuel. Le HEI a noté que les études examinées (principalement cohortes et cas-témoins) étaient de bonne qualité.

★ Pour la santé respiratoire de l'adulte, le HEI (2022) concluait à un niveau de confiance « modéré » dans les preuves disponibles pour soutenir l'association entre exposition à long terme au EC et mortalité toutes causes respiratoires. Moins de 3 études ont été identifiées pour l'incidence de l'asthme (1 étude), l'incidence de la BPCO (2 études) et la mortalité par BPCO (0 étude) ; aucune méta-analyse n'a été réalisée et aucun niveau de confiance n'a été attribué pour l'EC et ces événements de santé. Le HEI précise néanmoins que les résultats des études individuelles soutiennent la présence d'une association entre EC et incidence de l'asthme chez l'adulte.

### 3.2.1.3 Aspects mécanistiques ★

Concernant l'asthme, le HEI (2022) a identifié des études expérimentales chez l'humain décrivant les mécanismes d'inflammation éosinophilique et neutrophilique, induite par la stimulation de l'épithélium des voies respiratoires et les lésions oxydatives des voies respiratoires, comme les mécanismes les plus fréquents impliqués dans le développement et l'exacerbation de l'asthme en lien avec la pollution issue du trafic routier.

Concernant la BPCO, le stress oxydant, l'inflammation, la réduction de l'action ciliaire dans les voies respiratoires, la propagation des infections virales, l'augmentation de la réactivité bronchique et l'altération de la fonction ventilatoire sont des caractéristiques pertinentes dans le développement et/ou l'évolution de la maladie en lien avec la pollution issue du trafic routier. Une étude d'exposition humaine contrôlée aux fumées de diesel a montré que les patients atteints de BPCO présentaient un état inflammatoire activé accru par rapport aux populations à faible risque. Des études animales utilisant des expositions réelles aux polluants émis par le trafic routier pendant des périodes variables allant jusqu'à 7 mois ont observé des changements dans les voies respiratoires des rats (par exemple, diminution de la fonction

ventilatoire, métaplasie de la muqueuse, inflammation pulmonaire et remodelage des petites voies respiratoires) correspondant à ceux des patients atteints de BPCO, en association avec la libération de multiples cytokines par les cellules des voies respiratoires. Les résultats suggèrent que la fraction des particules joue un rôle plus important que les composants gazeux dans les lésions pulmonaires et le déclin de la fonction pulmonaire, et que les mécanismes moléculaires des lésions pulmonaires causées par les particules liées au trafic sont distincts de ceux des polluants gazeux.

Concernant les infections aiguës des voies respiratoires inférieures, le HEI (2022) indique que les mécanismes qui sous-tendent ces effets comprennent : une capacité réduite de l'hôte à produire des oxydants antimicrobiens, des effets inhibiteurs sur la sécrétion de cytokines pro-inflammatoires et de protéines surfactantes antimicrobiennes, une production accrue de médiateurs immunosuppresseurs et une réduction du potentiel cytotoxique des cellules tueuses naturelles.

### 3.2.2 Santé cardiovasculaire

#### 3.2.2.1 Court terme

L'US EPA (2019) rapportait la mise en évidence dans la littérature d'une association entre l'exposition à court terme au EC et la santé cardiovasculaire, similaire à celle observée pour les PM<sub>2,5</sub>, mais sans tirer de conclusion formelle.

L'Anses (2019) concluait à une indication « forte » d'effets à court terme de l'exposition à BC ou EC sur la santé cardiovasculaire. Cette conclusion était basée principalement sur les résultats d'études examinant la mortalité pour causes cardiovasculaires, les hospitalisations pour causes cardiovasculaires, les infarctus et événements coronariens, l'accident vasculaire cérébral (AVC) et l'insuffisance et la congestion cardiaque.

#### 3.2.2.2 Long terme

L'US EPA (2019) rapportait un nombre limité d'études avec des résultats incohérents sur l'exposition à long terme au BC et la santé cardiovasculaire.

L'Anses (2019) concluait à une indication « modérée » d'effets à long terme de l'exposition à BC ou EC sur la santé cardiovasculaire. Cette conclusion s'appuyait sur les résultats d'études examinant la mortalité pour causes cardiovasculaires, les infarctus et autres événements coronariens et, dans une moindre mesure, des marqueurs infracliniques d'inflammation systémique et de coagulation.

★ Le HEI (2022) concluait à des niveaux de confiance « forts » dans les preuves pour soutenir l'association entre exposition à long terme au équivalent-EC et mortalité toutes causes cardiovasculaires. Les études recensées, principalement de grandes études de cohortes, sont nombreuses et de bonne qualité et concernent plusieurs localisations géographiques. Neuf études ont été incluses dans la méta-analyse amenant à une estimation du risque positive et significative.

★ Le HEI (2022) concluait à des niveaux de confiance « modérés » dans les preuves pour soutenir l'association entre l'exposition à long terme au équivalent-EC et l'incidence de cardiopathies ischémiques ainsi que la mortalité associée. Les méta-analyses incluaient 5 et 6 études respectivement ; les estimations de risques correspondantes étaient positives et à la

limite de la significativité statistique, suggérant la présence d'une association. Le niveau de confiance dans les preuves était plus faible pour l'incidence d'AVC (« faible à modéré »).

Enfin, moins de 3 études étaient recensées pour l'incidence d'évènements coronariens (2 études) et pour la mortalité pour cause AVC (0 étude) ; aucune méta-analyse n'a été réalisée et aucun niveau de confiance n'a été attribué.

### 3.2.2.3 Aspects mécanistiques ★

Selon le HEI (2022), plusieurs études, en particulier portant sur les expositions à la fumée de diesel et aux particules diesel, décrivent un dysfonctionnement vasculaire, une susceptibilité accrue du cœur aux dommages ischémiques par une accélération de l'athérosclérose, une propension accrue à la thrombose et une altération fonctionnelle du système nerveux autonome. Le stress oxydant est le principal mécanisme sous-jacent suggéré pour ces effets. Peu de preuves expérimentales indiquent que l'exposition à la pollution issue du trafic routier, incluant le « carbone suie », aggraverait le risque d'AVC. Cependant, la dysfonction vasculaire possiblement liée au développement d'une athérosclérose pourrait conduire à une perfusion insuffisante des organes et induire potentiellement des lésions ischémiques, en plus d'une prédisposition accrue à la thromboembolie.

## 3.2.3 Mortalité toutes causes

### 3.2.3.1 Court terme

L'US EPA (2019) indiquait que le nombre d'études examinant les effets des composés des PM<sub>2,5</sub> sur la mortalité était croissant. Plusieurs composés des PM<sub>2,5</sub> étaient associés avec la mortalité mais aucun ne montrait une association plus forte que celle observée avec les PM<sub>2,5</sub>. L'US EPA (2019) rapportait la mise en évidence d'une association positive entre l'exposition à court terme à EC et la mortalité toutes causes, mais sans tirer de conclusion formelle.

L'Anses (2019) concluait à une indication « modérée » d'effets de l'exposition à BC ou EC à court terme sur la mortalité toutes causes. Cette conclusion s'appuyait sur les résultats de 3 études (sur les 8 identifiées) montrant des associations positives, significatives et robustes.

### 3.2.3.2 Long terme

L'US EPA (2019) rapportait que les études examinant les effets de l'exposition à long terme à BC ou EC sur la mortalité toutes causes mettaient en évidence une association significative, sans tirer de conclusion. Les résultats sont considérés comme moins précis et plus difficiles à interpréter que ceux relatifs à l'exposition aux PM<sub>2,5</sub>.

L'Anses (2019) concluait à une indication « forte » d'effets de l'exposition à BC ou EC à long terme sur la mortalité toutes causes. Cette conclusion s'appuyait sur les résultats de 6 études montrant des effets du BC ou EC sur la mortalité.

★ Le HEI (2022) concluait à un niveau de confiance « fort » dans les preuves pour soutenir l'association entre l'exposition à long terme au équivalent-EC et la mortalité toutes causes non accidentelles. Onze études étaient incluses dans la méta-analyse, menant à une estimation du risque positive et significative. Les études recensées, principalement de grandes études de cohortes, étaient considérées de qualité et concernaient plusieurs localisations géographiques.

### 3.2.4 Hospitalisations toutes causes

L'Anses (2019) concluait à une indication « forte » d'effets de l'exposition à court terme à BC ou EC sur le nombre de visites aux urgences, d'après les données d'études de séries temporelles montrant des associations positives, significatives et de forte amplitude. Aucune publication examinant la relation entre exposition à long terme à BC ou EC et les hospitalisations toutes causes n'était recensée.

### 3.2.5 Santé neurologique

#### 3.2.5.1 Court terme

L'US EPA (2019) a identifié peu d'études sur les composés des particules et leurs effets sur le système nerveux, sans conclure. Deux études ont été identifiées sur l'exposition à court terme au BC, en association avec des effets neurocomportementaux chez l'enfant et des symptômes de dépression chez l'adulte.

L'Anses (2019) n'a identifié aucune publication examinant la relation entre exposition à court terme au BC ou EC et la santé neurologique.

#### 3.2.5.2 Long terme

L'US EPA (2019) a identifié plusieurs études sur les composés des particules et les effets cognitifs chez l'enfant mais une seule étude chez l'adulte. L'US EPA concluait que le niveau de preuve était encore limité ; peu d'études portait sur l'indépendance des effets entre l'exposition à long terme aux composés et aux PM<sub>2,5</sub>.

L'Anses (2019) a conclu à une indication « faible » d'effets de l'exposition à long terme à BC ou EC sur la santé neurologique, d'après les données des études examinant le développement des performances cognitives chez l'enfant et montrant des associations positives et statistiquement significatives. Des indications plus faibles étaient rapportées pour l'autisme, l'hyperactivité et les symptômes de dépression.

★ Concernant la santé neurologique de l'enfant, le HEI (2022) recensait plusieurs études examinant le lien entre l'exposition à long terme au EC, BC ou Abs et le neurodéveloppement, en termes de performances cognitives (11 études issues de huit cohortes) ou de troubles déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (quatre études de cohortes). Les résultats étaient hétérogènes selon les domaines cognitifs, mais des associations suggestives étaient rapportées pour la baisse des fonctions cognitives (attention, fonction exécutive, mémoire...) et le diagnostic de trouble déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité de l'enfant.

★ Concernant la santé neurologique de l'adulte, le HEI (2022) recensait cinq études issues de quatre cohortes s'intéressant aux problèmes cognitifs, incluant la démence. Des résultats hétérogènes étaient observés entre les études, ainsi qu'entre les tests ou indicateurs cognitifs utilisés. Enfin, deux études en Europe examinant le lien entre l'exposition à long terme au EC, BC ou Abs et la maladie de Parkinson ont été identifiées ; aucune association n'était mise en évidence.

### 3.2.6 Santé périnatale

L'US EPA (2019) rapportait que peu d'études ont porté sur les effets des composés des particules et les issues de grossesse. Le composé le plus étudié est EC en lien avec le petit poids de naissance, avec la mise en évidence d'associations positives.

L'Anses (2019) concluait à une indication « modérée » d'effets de l'exposition à long terme à BC ou EC sur la santé périnatale. Cette conclusion était basée principalement sur les résultats de 3 études (sur les 4 identifiées) examinant le faible poids de naissance. Des indications plus faibles ressortaient pour la diminution du périmètre crânien à la naissance et pour les malformations congénitales.

★ Le HEI (2022) concluait à un niveau de confiance « modéré » dans les preuves pour soutenir l'association entre l'exposition au équivalent-EC pendant la grossesse et le petit poids de naissance à terme ; cinq études ont été identifiées. La confiance était moindre, de « très faible » à « faible », dans les preuves examinant le poids de naissance et la prématurité.

### 3.2.7 Cancer

L'US EPA (2019) rapportait que des études récentes portaient sur les effets des composés des particules et l'incidence ou la mortalité par cancer broncho-pulmonaire. Ces données sont cohérentes avec la mutagénicité et la génotoxicité des composés des particules et la plausibilité biologique des effets cancérogènes des particules. Le nombre limité d'études ne permettait cependant pas de conclure sur un niveau de preuve.

L'Anses (2019) concluait à une indication « inadéquate » d'effets de l'exposition à long terme à BC ou EC sur les cancers, incluant le cancer broncho-pulmonaire. Cette conclusion était basée principalement sur des associations non robustes à l'ajustement sur le tabac et d'autres variables individuelles. Des risques de biais liés au manque de variables individuelles (en particulier le tabac) et à l'estimation de l'exposition étaient également identifiés dans les études examinant la mortalité par cancers et l'incidence et la mortalité par cancer du poumon.

★ Le HEI (2022) concluait à un niveau de confiance « faible » dans les preuves examinant l'association entre l'exposition à long terme au équivalent-EC et la mortalité par cancer du poumon. Seules trois études étaient incluses dans la méta-analyse et l'estimation de risque correspondant était non significative. Les études étaient néanmoins de bonne qualité selon le HEI et incluaient des populations larges.

### 3.2.8 Diabète et troubles du métabolisme

#### 3.2.8.1 Court terme

L'US EPA (2019) ne rapportait pas d'effet de l'exposition à court terme au BC sur la santé métabolique car la littérature sur les composés des particules était très limitée, avec une seule étude s'intéressant aux sources.

L'Anses (2019) n'a recensé aucune publication examinant la relation entre exposition à court terme au BC ou EC et le diabète ou autres troubles du métabolisme.

### 3.2.8.2 Long terme

L'US EPA (2019) ne rapportait aucune étude portant sur les effets de l'exposition à long terme au BC ou EC sur la santé métabolique.

L'Anses (2019) concluait à une indication « inadéquate » d'effets à long terme du BC ou EC sur le diabète et les troubles du métabolisme, en se basant sur les résultats d'une étude examinant la mortalité cardiométabolique.

★ Le HEI (2022) concluait à un niveau de confiance « faible » dans les preuves examinant l'association entre l'exposition à long terme au équivalent-EC et l'incidence du diabète. Seules trois études étaient incluses dans la méta-analyse et l'estimation de risque correspondante, bien que positive, était non significative. Par ailleurs, une très forte hétérogénéité était constatée.

### 3.2.8.3 Aspects mécanistiques ★

Selon le HEI (2022), les études sur les animaux fournissaient des éléments de preuves montrant que l'exposition à de fortes concentrations de particules liées au trafic routier peut être un facteur de risque supplémentaire du développement du diabète, en particulier chez les individus présentant une résistance à l'insuline. De plus, ces études indiquaient que l'exposition maternelle aux particules diesel peut influencer de manière persistante l'homéostasie du glucose chez l'enfant. Concernant les voies mécanistiques possibles conduisant à ces troubles métaboliques, la pollution atmosphérique urbaine et routière initierait un processus inflammatoire et modifierait le métabolisme des acides gras.

## 3.2.9 Synthèse des effets sur la santé

Une synthèse des conclusions sur les effets sur la santé est présentée dans le Tableau 2, incluant les conclusions issues des trois rapports décrits précédemment : US EPA (2019), Anses (2019) et HEI (2022). Elles ont été complétées par les conclusions du rapport REVIHAAP de l'OMS (2013), qui a servi de base à l'évaluation du poids des preuves menée dans Anses (2019). Les indicateurs de santé recensés dans le Tableau 2 sont issus de ces références.

Tableau 2. Synthèse des effets sur la santé de l'exposition au « carbone suie » de l'air ambiant

Catégorie d'effets	Type d'exposition	Conclusions sur l'effet de l'exposition au « carbone suie » (BC, EC ou Abs) pour la catégorie d'effet				Indicateurs de santé recensés
		OMS (2013)	Anses (2019)	US EPA (2019)	HEI (2022)	
Santé respiratoire	Court terme	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Association positive	ND	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité toutes causes respiratoires</li> <li>● Hospitalisations pour causes respiratoires (toutes causes et cause spécifique : asthme, BPCO et infections)</li> <li>● Asthme (déclenchement des symptômes, traitement, hospitalisation) et sifflements</li> <li>● Altération des marqueurs de l'inflammation</li> </ul>
	Long terme	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Association positive	Confiance faible chez les <u>enfants</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité toutes causes respiratoires et mortalité pour cause BPCO</li> <li>● Incidence de l'asthme chez l'enfant, de l'asthme chez l'adulte, de la BPCO et des bronchites</li> <li>● Altérations des marqueurs de l'inflammation</li> <li>● Fonction pulmonaire</li> </ul>
Santé cardiovasculaire	Court terme	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Association positive	ND	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hospitalisations et mortalité toutes causes cardiovasculaires</li> <li>● Hospitalisations et mortalité pour causes spécifiques : maladie cardiaque ischémique, congestion cardiaque, infarctus et événements coronariens, AVC</li> <li>● Altérations des marqueurs infracliniques</li> <li>● Troubles du rythme cardiaque</li> </ul>
	Long terme	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Données limitées et discordantes	Confiance faible à modérée	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité toutes causes cardiovasculaires et cérébrovasculaires</li> <li>● Mortalité pour causes spécifiques : cardiopathie ischémique, AVC et maladies coronariennes (incluant infarctus)</li> <li>● Incidence de maladies coronariennes (incluant infarctus), d'AVC et d'événements coronariens</li> <li>● Altérations des marqueurs de l'inflammation ou de la coagulation</li> </ul>
Mortalité toutes causes	Court terme	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Associations positives	ND	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité toutes causes non accidentelles</li> </ul>
	Long terme	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Association positive	Confiance forte	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité toutes causes non accidentelles</li> </ul>
Hospitalisations toutes causes	Court terme	ND	Indication « forte » d'effets	ND	ND	
	Long terme	ND	Aucune publication identifiée	ND	ND	
Santé neurologique	Court terme	ND	Aucune publication identifiée	Association positive chez l'enfant et non significative chez l'adulte	ND	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Effets neurocomportementaux</li> <li>● Symptômes de dépression</li> </ul>
	Long terme	ND	Indication « modérée » d'effets	Association positive chez l'enfant	Associations positives rapportées	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Autisme</li> <li>● Fonctions cognitives (mémoire) et troubles de l'attention</li> <li>● Dépression et anxiété</li> </ul>

Catégorie d'effets	Type d'exposition	Conclusions sur l'effet de l'exposition au « carbone suie » (BC, EC ou Abs) pour la catégorie d'effet				Indicateurs de santé recensés
		OMS (2013)	Anses (2019)	US EPA (2019)	HEI (2022)	
<b>Santé périnatale</b>	Long terme	ND	Indication « modérée » d'effets	Associations positives	Confiance très faible à modérée	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Petit poids de naissance à terme (&lt;2 500 g), petit par rapport à l'âge gestationnel, poids de naissance</li> <li>● Prématurité</li> </ul>
<b>Cancer</b>	Long terme	ND	Indication « inadéquate » d'effets	Niveau de preuve insuffisant pour l'ensemble des composés	Confiance faible	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Cancer broncho-pulmonaire</li> <li>● Autres indicateurs documentés uniquement dans des méta-analyses récentes : <i>cancer du foie, tumeurs au cerveau, tumeurs du sein post-ménopause, cancer du rein</i></li> </ul>
<b>Troubles du métabolisme</b>	Court terme	ND	Aucune publication identifiée	Aucune publication identifiée	ND	
	Long terme	ND	Indication « inadéquate » d'effets	Aucune publication identifiée	Confiance faible	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité cardio-métabolique</li> <li>● Diabète</li> </ul>

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail ; AVC : accident vasculaire cérébral ; BPCO : broncho pneumopathie chronique obstructive ; HEI : Health Effect Institute ; ND : non disponible ; US EPA : United State Environmental Protection Agency ; OMS : Organisation mondiale de la santé.

## 4 Recueil des valeurs toxicologiques de référence existantes

Des VTR ont récemment été élaborées par l'Anses pour les particules de l'air ambiant (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) (Anses 2024).

**Aucune valeur toxicologique de référence (VTR), élaborée ou en cours, portant *stricto sensu* sur le « carbone suie » des particules de l'air ambiant** n'a été identifiée selon i) les bases de données des organismes recommandant des VTR et ii) une consultation internationale menée auprès de ces organismes par l'Anses, entre le 19 avril 2019 et le 31 mai 2019.

La seule VTR s'en rapprochant est une valeur à seuil élaborée par l'US EPA, révisée en 2003, pour les particules et gaz d'échappement diesel (Tableau 3) (US EPA 2003). ★ Le carbone élémentaire est en effet souvent associé aux émissions des moteurs diesel, car les conditions de combustion y sont favorables en comparaison des moteurs essence.

Cependant, cette VTR n'est pas jugée pertinente pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant. Tout d'abord, la valeur est ancienne et ne considère pas l'absence de seuil de concentration observée dans la littérature épidémiologique examinant les effets sanitaires des particules de l'air ambiant. De nombreuses données épidémiologiques existent désormais dans la littérature et les émissions d'échappement des moteurs diesel ont été classées cancérogènes par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) depuis lors, amenant la considération d'absence de seuil de concentration. De plus, elle porte sur la source diesel spécifiquement et sur une génération ancienne de moteur d'échappement diesel qui plus est. Enfin, les incertitudes associées à l'extrapolation du rat à l'humain *via* les facteurs d'incertitudes lié à la variabilité inter-espèces (composante toxicodynamique FI<sub>A-TD</sub>) et à la variabilité interindividuelle (FI<sub>H</sub>) sont difficilement quantifiables (Tableau 3).

★ **L'Anses considère plus pertinent de construire une VTR pour le « carbone suie » des particules dans l'air ambiant à partir d'études épidémiologiques récentes. Une étude préalable concluait à la faisabilité de construction d'une telle VTR sur la base de données épidémiologiques (cf. chapitre 1.2 et Annexe 1).**

Tableau 3. VTR chronique pour les particules et gaz d'échappement des moteurs Diesel (US EPA 2003)

Effet critique (étude clé)	Point de départ et ajustement	Facteur d'incertitude	VTR
Inflammation et histopathologie pulmonaires (Ishinishi <i>et al.</i> 1988) : études chez des rats exposés par inhalation 16 h/j, 6 j/semaine, pendant 130 semaines)	NOAEC = 460 µg.m <sup>-3</sup> de particules diesel = 100 mg.j <sup>-1</sup> <u>Ajustement allométrique</u> NOAEC <sub>HEC</sub> = 144 µg.m <sup>-3</sup> de particules diesel	30 FI <sub>A-TD</sub> = 3 FI <sub>H</sub> = 10	RfC = 5 µg.m <sup>-3</sup>

HEC : concentration équivalente humaine ; NOAEC : No Observed Adverse Effect Concentration ; RfC : Reference Concentration ; FI<sub>A-TD</sub> : Facteur d'incertitude inter-espèces, composante toxicodynamie ; FI<sub>H</sub> : Facteur d'incertitude interindividuelle.

## 5 Méthode de construction des VTR par voie inhalée pour le « carbone suie »

La méthode mise en œuvre pour dériver les VTR long terme et court terme par voie inhalée pour le « carbone suie » est identique à celle appliquée pour les particules de l'air ambiant (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub>) (Anses 2024). Ne sont inclus dans le présent rapport que des éléments synthétiques et spécifiques à la construction de VTR pour le « carbone suie ».

### 5.1 Etapes de construction

La méthode choisie s'appuie sur la démarche de construction de VTR communément appliquée pour des substances chimiques individuelles, décrite dans le guide d'élaboration des VTR de l'Anses (Anses 2017). Les 5 étapes de construction sont brièvement décrites ci-dessous et dans la Figure 11.

1) Identification du ou des évènements sanitaires d'intérêt, clairement néfastes pour la santé humaine (i.e. choix de l'effet critique) (cf. chapitre 5.2). Seuls les évènements avec des niveaux de causalité *a minima* modéré sont retenus dans la suite de la démarche.

2) Hypothèse de construction : sans seuil de concentration (cf. chapitre 5.3). Seule l'hypothèse de l'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé a été retenue. Cette hypothèse répond au dernier cadre conceptuel des relations dose-réponse en évaluation des risques proposé par le *National Research Council* (NRC) aux États-Unis (NRC 2009), prenant en compte l'exposition de fond de la population générale et les facteurs de prédisposition individuels – dont les particules de l'air ambiant sont un exemple.

3) Choix d'une ou plusieurs études clés fournissant une ou des fonctions concentration-risque<sup>14</sup> de meilleure qualité et validité externe pour chaque évènement sanitaire retenu (cf. chapitre 5.4). Plusieurs fonctions peuvent être sélectionnées pour un même évènement. Seules les études épidémiologiques ont été considérées. La littérature épidémiologique fournit en effet des estimations quantitatives de risques sanitaires en population générale sur des organes et/ou systèmes cibles d'intérêt. Les méta-analyses de publications et les études de cohorte multicentriques ont été privilégiées. Le modèle décrivant la forme de la fonction concentration-risque a été considéré, qu'il soit linéaire ou non linéaire.

4) Calcul des excès de risque vie entière (ELR) et des excès de risque journalier (EDR) pour les différents évènements sanitaires retenus, selon les niveaux de concentrations habituellement observés en France (cf. chapitre 5.5). Ces calculs exploitent les fonctions concentration-risque sélectionnées à l'étape précédente. Pour l'élaboration de la VTR long terme, les deux approches préconisées dans le guide d'élaboration des VTR de l'Anses ont été considérées : approche dite simple et approche par table de survie. L'approche par table de survie a été privilégiée quand les données nécessaires (incidence ou mortalité par classes d'âge en France pour l'évènement sanitaire d'intérêt) étaient disponibles. Pour l'élaboration de la VTR court terme, l'approche dite simple est applicable au calcul d'un excès de risque

<sup>14</sup> Le terme « concentration-risque » est préféré à celui de « dose-réponse » dans les présents travaux en raison de l'exploitation d'un corpus d'études épidémiologiques. En effet, les études épidémiologiques mettent généralement en relation des concentrations de polluants dans l'air ambiant avec un risque pour la santé.

journalier. Il s'agit par ailleurs de la seule approche préconisée dans le guide d'élaboration de l'Anses (Anses 2017a, révision à paraître) pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions court terme. Compte tenu de l'exploitation d'études épidémiologiques en population générale, aucun ajustement temporel ou allométrique n'est requis à cette étape.

**5) Détermination de la VTR recommandée** correspondant à l'excès de risque unitaire (ERU) le plus protecteur pour la santé (i.e. amplitude de l'ERU la plus élevée) (cf. chapitre 5.6) parmi les ERU calculés pour chaque événement sanitaire retenu. L'ERU est l'excès de risque vie entière par unité d'exposition s'agissant de la VTR long terme, et l'excès de risque journalier par unité d'exposition s'agissant de la VTR court terme. Il est égal à la pente de l'interpolation linéaire de la courbe représentant l'excès de risque (ELR ou EDR) sur une gamme de concentration prédéfinie. A chaque ERU est associé un niveau de confiance.

Cette méthode de détermination de valeur sans seuil à partir d'études épidémiologiques a déjà été appliquée pour caractériser l'incidence de (ou la mortalité par) cancers en fonction de l'exposition à une substance chimique (ex : trichloréthylène) ou à des radionucléides (ex : radon) (Goldbohm *et al.* 2006; NRC 1988; US EPA 2002).

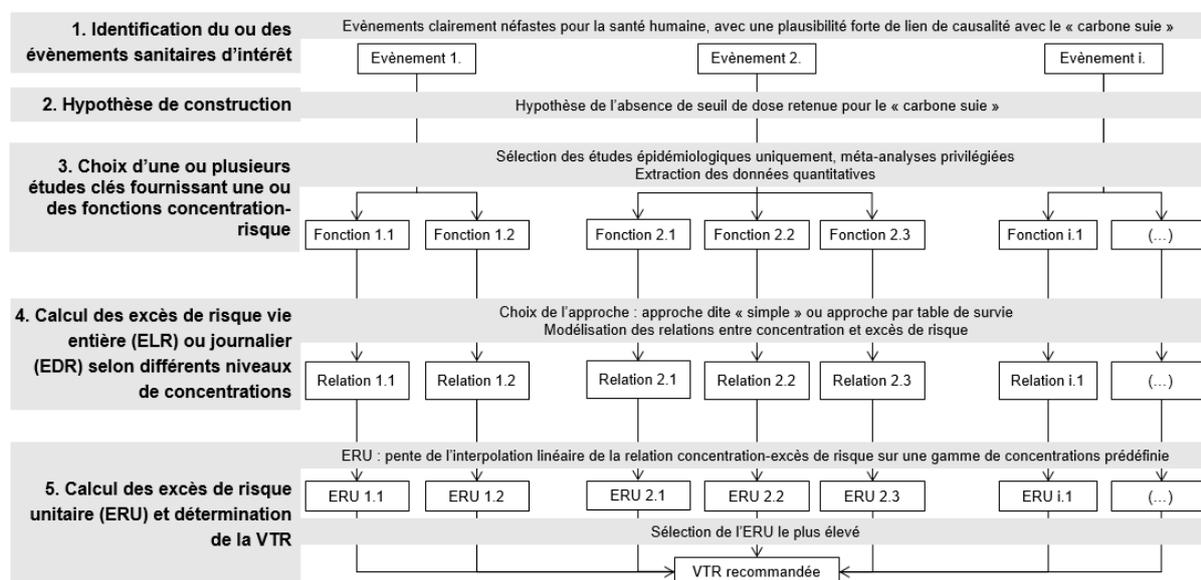


Figure 11. Démarche de construction des VTR par voie respiratoire pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

## 5.2 Identification des événements sanitaires d'intérêt

Les événements néfastes pour la santé, candidats à l'élaboration des VTR pour le « carbone suie », sont identifiés à partir des événements de santé recensés au chapitre 3 et doivent répondre aux deux critères suivants :

- événements correspondant à un événement clinique néfaste observé chez l'Homme,
- événements pour lesquels les niveaux de plausibilité d'un lien de causalité sont qualifiés de fort ou modéré.

Un événement clinique néfaste pour la santé est défini comme l'ensemble des événements considérés dans la pyramide des effets sanitaires associés à la pollution de l'air par OMS (2001), tels que des décès anticipés ou des pathologies cardio-respiratoires. Les événements

infracliniques, tels que des variations de paramètres ou fonctions biologiques (par exemple, biomarqueurs de développement de l'athérosclérose ou développement de la fonction pulmonaire chez l'enfant) n'ont pas été considérés pour la construction des VTR. En effet, bien que les études examinant ces événements infracliniques soient essentielles pour établir une plausibilité biologique, elles sont difficilement exploitables dans la prédiction quantitative de risques pour la santé humaine compte tenu du caractère plus ou moins pronostique de l'évènement considéré et du manque de données de distributions de ces paramètres ou fonctions en population générale

Le niveau de plausibilité d'un lien de causalité a été qualifié par les experts du GT en trois catégories (fort, modéré, faible) selon les conclusions issues de rapports institutionnels récents intégrant l'ensemble des preuves épidémiologiques et toxicologiques (cf. chapitre 3) et leur jugement d'experts.

### 5.3 Hypothèse de construction

L'hypothèse de l'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé a été retenue pour la construction des VTR pour les particules de l'air ambiant (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) (Anses 2024). Des fonctions concentration-risque ne considérant pas de seuil de concentration sont d'ores et déjà utilisées dans la construction de différents outils d'aide à la décision relatifs à la pollution atmosphérique, tels que dans les évaluations quantitatives d'impact sanitaire (HEI 2020; OMS 2020a; Santé Publique France 2019) ou les valeurs guides ou normes de qualité de l'air ambiant (OMS 2021; US EPA 2021).

**Le « carbone suie » étant un composant, parfois majeur, des particules de l'air ambiant dans de nombreux contextes, les éléments conceptuels soutenant l'hypothèse de construction sans seuil sont *a priori* valables pour la fraction carbonée.**

Brièvement, l'hypothèse de construction sans seuil a été expliquée par l'existence d'une large distribution des seuils individuels en lien avec les facteurs génétiques, les autres facteurs de risque environnementaux et les états pathologiques et comportementaux (Schwartz, Laden et Zanobetti 2002). Ces fondements du modèle de construction de relations dose-réponse sans seuil de concentration sont décrits par le NRC de l'Académie des Sciences américaine, au sein duquel les particules de l'air ambiant sont prises en exemple (NRC 2009). Cette hypothèse est valable pour des durées d'exposition à court terme et long terme.

Par ailleurs, des études épidémiologiques récentes ont précisé la forme de la relation entre les niveaux de concentrations en carbone suie, carbone élémentaire ou absorbance sur le long terme et la survenue de divers événements sanitaires. Ces analyses de grande ampleur en Europe montrent de manière récurrente que l'association persiste à de faibles niveaux de concentrations, sans seuil discernable (Nilsson Sommar *et al.* 2021; Strak *et al.* 2021; Wolf *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021; Zare Sakhvidi *et al.* 2022).

## 5.4 Sélection des études clés et des fonctions concentration-risque

### 5.4.1 Choix de la littérature épidémiologique

Seules les études épidémiologiques ont été considérées comme études clés pour sélectionner les fonctions concentration-risque et ce, en raison de la littérature épidémiologique existante fournissant des estimations quantitatives de risques sanitaires en population générale sur des organes et/ou systèmes cibles pour lesquels il existe une plausibilité biologique solide et une plausibilité modérée ou forte de causalité (cf. chapitres 5.2).

La littérature expérimentale chez l'animal est également conséquente pour le « carbone suie », mais examine un type ou un échantillon spécifique de particules (tels que les échappements des motorisations diesel), souvent à des concentrations très élevées. L'hétérogénéité de la composition physico-chimique des particules auxquelles est exposée la population rend difficile la généralisation des résultats expérimentaux. L'extrapolation quantitative de ces résultats est également complexe et incertaine de par les différences physiologiques et anatomiques entre les rongeurs et les humains, la validité des modèles dosimétriques existants étant encore limitée pour les particules de l'air ambiant (Anses 2024).

**En conclusion, le GT considère que l'incertitude associée à la variabilité des aérosols urbains et aux potentiels biais des études épidémiologiques est probablement moins grande en comparaison de celle associée à une extrapolation animal-humain, justifiant le choix d'exploiter la littérature épidémiologique dans les présents travaux. Ce choix méthodologique répond en outre aux recommandations du guide d'élaboration des VTR de l'Anses.**

### 5.4.2 Recherche bibliographique et sélection des études

Les premières requêtes bibliographiques avaient été élaborées lors de la phase d'étude de la faisabilité de construction des VTR pour le « carbone suie » (Annexe 3). Les moteurs de recherche Pubmed® et Scopus® avait été consultés pour la dernière fois en janvier 2020. Ces requêtes permettaient d'assurer l'inclusion de publications connues *a priori* par le GT et considérées pertinentes (Luben *et al.* 2017; Yang *et al.* 2019). Les requêtes ont été mises à jour et relancées en juin 2023 afin d'identifier la littérature la plus récente<sup>15</sup> (Annexe 3).

Une première sélection des références obtenues a été réalisée sur la base du titre et du résumé par deux coordinateurs de l'Anses. Les critères PECOTS d'inclusion et d'exclusion ont été prédéfinis par le GT (Tableau 4). Les publications ont été sélectionnées pour inclusion dans les étapes suivantes après examen du texte intégral. Seules les références publiées en anglais ou en français ont été considérées.

---

<sup>15</sup> L'inclusion des études pour la construction de la VTR long terme a été arrêtée aux références publiées jusqu'en octobre 2022. L'inclusion des études pour la construction de la VTR court terme a été arrêtée aux références publiées jusqu'en juin 2023.

Tableau 4. Critères PECOTS définis par le GT pour sa recherche et sélection bibliographique

Critère	Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
<b>Population</b> (ou sujets étudiés)	Étude épidémiologique examinant la population générale, incluant les sous-populations plus vulnérables et sensibles à la pollution atmosphérique. Ces dernières sont définies de manière cohérente avec les recommandations sanitaires du Ministère des solidarités et de la santé en cas de pic de pollution*.	Étude épidémiologique en environnement professionnel Étude expérimentale humaine (en chambre d'inhalation par exemple) Étude expérimentale chez l'animal
<b>Exposition</b>	Concentrations en « carbone suie » (fraction carbonée BC, EC ou Abs) dans l'air ambiant extérieur	Absence de concentrations en « carbone suie » dans l'air ambiant extérieur dans les analyses Utilisation d'une autre métrique que BC, EC ou Abs pour décrire le carbone suie dans l'air ambiant extérieur Étude épidémiologique portant spécifiquement sur une ou des sources de particules** (sources industrielles ou combustion de biomasse par exemple) Étude épidémiologique examinant certaines saisons uniquement
<b>Comparateur</b>	Analyse statistique estimant l'effet sanitaire à partir de la variabilité de la concentration en « carbone suie » dans l'air ambiant extérieur (incrément de x unités de concentration ou d'un intervalle interquartile)	Absence de groupe de comparaison Groupe de comparaison non adapté ou différent.
<b>Outcome</b> (événements de santé)	Tous les événements retenus à l'étape « identification du ou des événements cliniques d'intérêt » (cf. chapitre 5.2).	Tous les événements non retenus à l'étape « identification du ou des événements cliniques d'intérêt » (cf. chapitre 5.2).
<b>Timings</b> (durée d'exposition)	Expositions à long terme (une à plusieurs années), expositions à court terme (un à plusieurs jours), exposition gestationnelle, exposition périnatale	
<b>Setting</b> (localisation d'intérêt)	Si exposition à long terme : localisations géographiques en Europe. Si exposition à court terme : localisations géographiques en Europe et en Amérique du Nord***.	Si exposition à long terme : aucune localisation en Europe. Si exposition à court terme : aucune localisation en Europe ou en Amérique du Nord***.

Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire. \* Voir : <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/air-exterieur/article/se-protger-en-cas-de-pic-de-pollution-de-l-air>. \*\*Les études portant spécifiquement sur les sources de particules sont exclues car elles constituent un corpus d'études très hétérogènes entre elles en comparaison de celles examinant les particules de l'air ambiant urbain considéré dans sa globalité. \*\*\* Compte tenu du corpus d'études limité issu des premières recherche et sélection bibliographiques restreintes aux études incluant des localisations en Europe, le critère d'inclusion a été élargi aux études incluant des localisations en Europe ou en Amérique du Nord.

Les études ou méta-analyses examinant plusieurs localisations géographiques dans plusieurs pays ont été préférées aux études n'incluant qu'une seule localisation. En effet, les fonctions concentration-risque issues d'études multicentriques sont supposées plus robustes, en raison de l'hétérogénéité des populations ou des expositions d'une localisation à une autre. Elles sont également considérées plus représentatives de la population d'intérêt pour les présents travaux (population française), en particulier si des localisations européennes ou françaises y sont incluses.

La combinaison de plusieurs études, par une méta-analyse ou par une analyse dite poolée, est particulièrement d'intérêt car elle synthétise un grand nombre d'informations (différentes populations, différents pays, etc.). Ce type d'analyse augmente la puissance statistique (et

donc la précision) de l'estimation de risque obtenue ainsi que sa transposabilité à une autre population. Ces caractéristiques sont recherchées pour la construction d'une VTR.

Les publications examinant les fumées noires (*black smoke* en anglais) (cf. chapitre 2.3) n'ont pas été retenues comme d'intérêt en raison de l'ancienneté des données et de l'obsolescence de la méthode de mesure datant de la fin des années 1960.

Pour la construction de la VTR long terme, les études épidémiologiques d'intérêt incluent les études de cohortes longitudinales, prospectives ou rétrospectives, permettant de décrire les effets sanitaires des expositions chroniques sur de larges échantillons de la population générale. Les principaux facteurs de confusion individuels (incluant âge, sexe, niveau d'éducation, consommation de tabac) sont généralement pris en compte dans les analyses statistiques. Les outils récents de modélisation permettant d'estimer l'exposition à long terme sont considérés robustes. Seules les études incluant des localisations géographiques en Europe sont d'intérêt pour la construction de la VTR long terme.

Pour la construction de la VTR court terme, les études épidémiologiques d'intérêt incluent les études de série temporelle (aussi appelées séries chronologiques), cas-croisés ou non, permettant de décrire les effets sanitaires des expositions à court terme sur de larges territoires incluant de larges échantillons de la population générale. Les facteurs de confusion alors pris en compte ne sont plus individuels mais liés aux variations temporelles de l'exposition ou de l'état de santé (par exemple, la température ou l'activité du virus grippal). L'exposition est généralement estimée par les moyennes journalières sur le territoire étudié, à partir de concentrations mesurées en stations de fond urbain. Les études incluant des localisations géographiques en Europe et en Amérique du Nord sont d'intérêt pour la construction de la VTR court terme.

Les études interventionnelles, expérimentales et de panel, portant sur des échantillons moins larges et moins représentatifs de la population générale, et examinant souvent des marqueurs d'effets infracliniques, ne font pas partie des types d'étude épidémiologique d'intérêt pour le GT.

**Les références finalement retenues sur la base des critères PECOTS constituent le corpus d'études utilisé par la suite pour sélectionner les fonctions concentration-risque de meilleure qualité et validité externe<sup>16</sup>.**

#### 5.4.3 Extraction des données quantitatives décrivant les fonctions concentration-risque

Les fonctions concentration-risque disponibles dans les études épidémiologiques sélectionnées précédemment ont été extraites. Les données quantitatives d'intérêt correspondent aux indicateurs de risque rapportés dans les publications, permettant de quantifier la relation entre l'exposition au « carbone suie » et un événement de santé parmi ceux sélectionnés précédemment. Ces indicateurs prennent généralement la forme de risques relatifs (RR), de variation relative du risque ( $\%_{\text{change}}$ ), d'odds ratio (OR) ou de hazard ratio (HR), exprimés pour un incrément de concentration en « carbone suie ». La fonction concentration-risque est alors supposée log-linéaire. Les relations non linéaires s'expriment quant à elles sous la forme de modèles mathématiques (par exemple, modèles SCHIF ou fonctions splines). Brièvement, la classe de modèles SCHIF (*shape constrained health impact function*) a

---

<sup>16</sup> Validité externe : la capacité de ces fonctions concentration-risque à être appliquées ou généralisées à notre population cible (française).

initialement été développée par Nasari *et al.* (2016) pour l'application à des grandes études de cohortes et à l'évaluation d'impact sanitaire. La méthode SCHIF évalue plusieurs variations de fonctions sigmoïdales, afin d'obtenir un modèle final dit i) optimal (quand il s'ajuste au mieux aux données en termes de valeur du critère d'Akaike) ou ii) d'ensemble (quand il se base sur l'ensemble des variations pondérées par leur valeur du critère d'Akaike). Dans le cadre des présents travaux, le GT privilégie le modèle ensemble car il reflète mieux les incertitudes autour de l'estimation de la forme (non linéaire). Enfin, les fonctions spline sont définies par morceaux par des polynômes. Le choix du nombre de nœuds (créant les morceaux) et le degré des polynômes peuvent être basés sur des critères statistiques. Le degré de la spline est défini par le polynôme de plus haut degré utilisé ; on parle notamment de spline cubique si tous les polynômes sont du troisième degré.

Toutes les fonctions concentration-risque ont été identifiées et extraites, quelle que soit leur forme (RR, OR, HR, %<sub>change</sub>, modèle mathématique). Les analyses dénommées « principales » par les auteurs ont été privilégiées mais les fonctions issues d'analyses secondaires, de sensibilité ou stratifiées suivantes ont également été extraites : analyse incluant uniquement des localisations européennes, analyse incluant uniquement certains sous-groupes de concentrations, analyse ajustant sur des variables contextuelles (en sus des variables individuelles) et analyse incluant uniquement des populations sensibles (par exemple, personnes âgées de plus de 65 ans).

Les fonctions concentration-risque prenant la forme d'un RR associé à un incrément de  $x$  unités de concentration en BC, EC ou Abs ( $RR_x$ ) ont été standardisés sous la forme d'un coefficient de régression  $\beta$ . Ce dernier relie la concentration d'exposition et le risque et est exprimé pour un incrément de 1 unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pour BC et EC ;  $1\cdot 10^{-5} \text{m}^{-1}$  pour Abs). La même équation s'applique pour les bornes de l'intervalle de confiance statistique encadrant  $RR_x$ .

$$\beta = \ln\left(\frac{RR_x}{x \times \text{unité de concentration}}\right)$$

Dans le cas d'une fonction concentration-risque prenant la forme d'un OR, l'OR a été considéré équivalent à un RR par approximation, le taux d'incidence des événements de santé concernés étant inférieur à 10 % dans la population générale (Zhang et Yu 1998). L'équation ci-dessus a donc été appliquée de manière similaire. Le HR a été lui aussi considéré équivalent au RR en faisant l'hypothèse de proportionnalité des risques au cours du temps. En effet, le HR est similaire au RR mais intègre en plus une notion temporelle pour prendre en compte une durée inconnue d'apparition de l'évènement et des durées de suivi différentes entre les sujets.

Dans le cas des fonctions concentration-risque correspondant à un modèle mathématique décrivant la forme de la relation, l'équation a été directement extraite pour être utilisée aux étapes ultérieures. A défaut de données quantitatives disponibles, les modèles paramétriques correspondant à ces fonctions concentration-risque étaient reconstruits à partir des figures présentées dans les publications. Cette reconstruction a été réalisée à l'aide du logiciel WebPlotDigitizer 4.2.

Cette étape d'extraction a été réalisée par deux coordinateurs pour les publications examinant l'exposition à long terme et par un expert rapporteur pour le court terme. Un tableau a été élaboré spécifiquement pour l'extraction. Des informations descriptives ont également été collectées dans le même fichier (localisation géographique, type d'étude, population d'étude, etc.).

#### 5.4.4 Conversion des fonctions concentration-risque en « équivalent-absorbance »

L'estimation centrale des fonctions concentration-risque standardisées (i.e.  $\beta$  mentionné précédemment) examinant l'exposition à long terme au carbone suie et au carbone élémentaire ont été converties pour être exprimées en « équivalent absorbance ». L'erreur standard permettant de définir l'intervalle de confiance statistique à 95 % a été recalculée à partir des  $\beta$  centraux après conversion en « équivalent absorbance ». Les équations de conversion appliquées reprennent les facteurs proposés par HEI (2022) (cf. chapitre 2.3.4) et sont les suivantes :

$$\text{équivalent absorbance } (m^{-1}) = \frac{1,25}{1,10} \times BC (\mu g \cdot m^{-3})$$

$$\text{équivalent absorbance } (m^{-1}) = \frac{1}{1,10} \times EC (\mu g \cdot m^{-3})$$

Les fonctions concentration-risque, qu'elles soient converties en équivalent Abs ou exprimées directement en Abs, sont finalement exprimées en RR associés à un incrément de  $1 \cdot 10^{-5}$  unité d'absorbance dans la suite.

Bien qu'une telle conversion ajoute une incertitude supplémentaire aux résultats et qu'elle ne puisse pas se traduire dans les intervalles de confiance statistique, elle seule permet les comparaisons des fonctions concentration-risque initialement obtenues pour des métriques différentes. L'absorbance a été sélectionnée comme métrique de destination car la majorité des fonctions extraites étaient déjà exprimées pour l'absorbance.

Aucune conversion n'a été appliquée pour les fonctions concentration-risque examinant l'exposition à court terme en raison de la variabilité entre les différentes métriques (cf. chapitre 2.3.4). Les comparaisons des fonctions concentration-risque examinant différentes métriques sont donc soumises à des limites.

#### 5.4.5 Analyse et sélection des fonctions concentration-risque d'intérêt

Les fonctions concentration-risque ont été regroupées par évènement de santé examiné, durée et type d'exposition considérés (court terme ou long terme) et population étudiée (nouveau-nés, enfants, adultes, femmes enceintes, personnes âgées).

Pour chaque fonction au sein des groupes ainsi formés, un niveau d'intérêt pour construire une VTR a été proposé (fort, modéré ou faible) sur la base de i) l'examen du texte intégral de la publication<sup>17</sup> et ii) différents critères d'évaluations décrivant la nature, la robustesse, la puissance et la validité externe de la fonction (Tableau 5). Le niveau d'intérêt tend vers fort quand les critères sont positifs et tend vers faible quand les critères sont négatifs, au regard de la qualité et pertinence de la publication pour l'objectif.

<sup>17</sup> Deux outils ont été exploités pour standardiser davantage cet examen pour les études examinant l'exposition à court terme. La checklist MOOSE a été utilisée pour les méta-analyses de publications (Brooke, Schwartz et Pawlik 2021) tandis que l'outil *WHO RoB* a été utilisé pour les analyses poolées, les analyses multicentriques, les méta-analyses d'études ou les méta-analyses de villes (OMS 2020b).

Tableau 5. Critères d'évaluations décrivant la nature, la robustesse, la puissance et la validité externe des fonctions concentration-risque

Est-ce une méta-analyse, analyse multi-centrique ou analyse poolée ?	L'estimation du risque est-elle suffisamment précise ?	La forme de la fonction concentration-risque est-elle caractérisée ?	Les données de santé sont-elles cohérentes ?	Le risque est-il associé à un lag bien défini ? (court terme uniquement)	Des localisations en France ou en Europe sont-elles incluses ?	L'hétérogénéité est-elle suffisamment faible ( $I^2 < 40\%$ ) ?	La fin de la période de suivi (long terme) ou la période d'étude (court terme) est-elle suffisamment récente ?
Oui ou Non	Oui ou Non	Oui ou Non	Oui ou Non ou ND (non disponible)	Oui ou Non ou ND (non disponible)	Oui ou Non ou ND (non disponible)	Oui ou Non ou SO (sans objet) ou ND (non disponible)	<2000, 2000-2010, >2010, ou mixte.
	<i>La précision est le degré de certitudes entourant une estimation de risque. Les intervalles de confiance à 95 % sont utilisés pour évaluer l'imprécision conformément aux lignes directrices de l'OHAT (NTP OHAT 2015). En complément, pour les études examinant la mortalité à court terme, l'estimation est considérée précise si le nombre de décès considéré dans le calcul est <math>\geq 100\ 000</math> (Orellano et al. 2020).</i>	<i>La forme de la fonction concentration-risque peut être caractérisée par un modèle mathématique (par exemple : modèles Shape Constrained Health Impact Function (SCHIF) ou fonctions splines).</i>	<i>Les données de santé sont considérées cohérentes lorsque i) le même indicateur de santé est utilisé dans les différentes études incluses dans une méta-analyse ou analyse poolée (par exemple, mêmes codes CIM ou codes CIM proches) et ii) il n'est pas attendu de différence majeure sur le diagnostic ou codage de la pathologie entre les études.</i>	<i>Le lag est le nombre de jours de décalage entre l'exposition et la survenue de l'évènement de santé</i>		<i><math>I^2</math> est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard. <math>I^2</math> varie de 0 % (hétérogénéité nulle) à 100 % (forte hétérogénéité). <math>I^2 &lt; 40\%</math> correspond à une hétérogénéité qui pourrait ne pas être importante conformément aux lignes directrices de l'OHAT (NTP OHAT 2015).</i>	<i>Récent : &gt;2010 ; Intermédiaire : 2000-2010 ; Ancien : &lt;2000</i>

CIM : classification internationale des maladies ; OHAT : Office of Health Assessment and Translation ; NTP : National Toxicology Program.

L'analyse des fonctions concentration-risque a été réalisée par deux coordinateurs pour les publications examinant l'exposition à long terme et par un expert rapporteur pour le court terme. Les niveaux d'intérêt finaux étaient adoptés après révision par l'ensemble du GT. L'analyse est consignée dans un tableau.

**Pour un même évènement de santé, une même exposition, une même catégorie d'âge et une même durée, les fonctions concentration-risque sélectionnées pour la suite de la démarche sont celles qui présentent des niveaux d'intérêt *a minima* modéré pour la construction d'une VTR.**

## 5.5 Calcul des excès de risque

### 5.5.1 Excès de risque vie entière (ELR) (long terme)

L'excès de risque vie entière (ELR, *Excess Lifetime Risk*) correspond à la probabilité supplémentaire d'occurrence d'un évènement sanitaire due à une exposition d'intérêt durant la vie entière d'un individu, qui vient s'ajouter à la probabilité d'occurrence de l'évènement non liée à cette exposition. Cet ELR est utilisé pour dériver la VTR long terme.

#### 5.5.1.1 Approches

Le calcul de l'ELR consiste à projeter une fonction concentration-risque sur le risque de fond de l'évènement de santé considéré, observé dans la population cible (i.e. la population française – métropole et départements et régions d'Outre-mer – dans les présents travaux). L'ELR ne peut pas être calculé en l'absence de donnée de fond.

Ces données de fond correspondent à des taux de mortalité ou d'incidence d'un évènement ou d'une pathologie. Ils ont été recherchés dans les bases de données et références suivantes : les séries statistiques de mortalité totale et par causes médicales en France disponibles en ligne<sup>18</sup> et obtenues auprès du Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDC) (INSERM-CépiDC 2019, 2020) ; la base Géodes de géodonnées en santé publique<sup>19</sup> ; la cartographie des pathologies et des dépenses de l'Assurance Maladie<sup>20</sup> ; le rapport sur l'état de santé de la population en France (DREES et Santé Publique France 2017) ; le rapport sur les estimations nationales de l'incidence et de la mortalité par cancer en France métropolitaine entre 1990 et 2018 (Defossez *et al.* 2019) ; des données de létalité après un AVC (Gauthier *et al.* 2020) ; la base de données *Global Health Data Exchange* de l'*Institute for Health Metrics and Evaluation*<sup>21</sup> et les données mondiales sur les nouveaux nés présentant une insuffisance pondérale<sup>22</sup>.

Deux approches, décrites en détail dans Anses (2024), sont typiquement utilisées pour dériver l'ELR en fonction de différents niveaux d'exposition : l'approche dite simple et l'approche par table de survie. Le Tableau 6 synthétise les données et équations utilisées dans chacune de ces approches. Elles peuvent toutes deux s'appliquer avec les fonctions concentration-risque rapportées dans les études épidémiologiques mais n'utilisent pas le même type de données

<sup>18</sup> <https://www.cepdc.inserm.fr/causes-medicales-de-deces/interroger-les-donnees-de-mortalite>

<sup>19</sup> <https://geodes.santepubliquefrance.fr/#c=indicator&view=map2>

<sup>20</sup> <https://assurance-maladie.ameli.fr/etudes-et-donnees/par-theme/pathologies/cartographie-assurance-maladie>

<sup>21</sup> <http://ghdx.healthdata.org/>

<sup>22</sup> <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SH.STA.BRTW.ZS?view=map>

de fond – l'approche par table de survie nécessitant la disponibilité de données par classe d'âge.

Dans le cas d'une exposition ubiquitaire concernant l'ensemble de la population, telle que l'exposition au « carbone suie » des particules de l'air ambiant, le risque de fond vie entière ne peut pas être calculé car il n'existe pas de population non exposée. Les équations proposées pour calculer l'ELR ont alors été adaptées en multipliant le risque de fond par l'inverse de la fonction concentration risque, permettant alors d'estimer un ELR avec l'effet de l'exposition retiré (Korte *et al.* 2000). Cette adaptation est appelée « décrémentationale » et est appliquée dans les présents travaux.

Par construction, l'ELR obtenu avec l'approche par table de survie est considéré plus précis que celui obtenu par l'approche dite simple. En effet, les tables de survie permettent le calcul de probabilités conditionnelles à la survie d'une tranche d'âge à l'autre, prenant ainsi en compte l'existence de potentiels risques compétitifs<sup>23</sup>, différents de l'évènement de santé d'intérêt, et ce tout au long de la vie. De plus, si les données correspondantes sont disponibles, les tables de survie autorisent i) la variation du risque au cours de la vie, ii) la variation du risque de fond non liée à l'exposition d'intérêt en fonction de l'âge et iii) la prise en compte de l'existence d'un temps de latence entre l'exposition et la survenue de l'évènement de santé. En comparaison, l'approche dite simple repose uniquement sur la probabilité moyenne d'occurrence d'un évènement de santé, sans considérer les différences selon l'âge ou les éventuels risques compétitifs qui pourraient impacter cette probabilité. Enfin, il est à noter que la différence entre les ELR calculés selon ces deux approches tend à augmenter aux âges avancés, avec un ELR plus conservateur rapporté par l'approche dite simple. Ce résultat se justifie par l'absence de prise en compte des risques compétitifs, dont l'impact augmente avec l'âge. Goldbohm *et al.* (2006) suggèrent que la table de survie peut être remplacée par l'approche dite simple si le risque de fond de la pathologie est faible et si le risque lié au polluant est faible, ou si l'âge auquel le risque est considéré pertinent est relativement faible (<70 ans).

**Ainsi, l'approche par table de survie avec une adaptation décrémentationale a été privilégiée par le GT car elle fournit des résultats plus précis prenant en compte l'existence de risques compétitifs ainsi que l'éventuelle variation du risque au cours de la vie.** Quand l'approche par table de survie n'était i) pas possible en raison de l'indisponibilité des données sur le risque de fond par classe d'âge ou ii) non requise en raison de la tranche d'âge relativement jeune de survenue de l'évènement de santé (par exemple, petit poids de naissance), le GT a appliqué l'approche dite simple avec une adaptation décrémentationale.

---

<sup>23</sup> Un risque compétitif est la survenue d'une situation ou d'un évènement (autre que celle ou celui d'intérêt) impactant fondamentalement la probabilité d'occurrence de l'évènement de santé d'intérêt. Dans ce cas précis, c'est le décès – quel qu'en soit la cause – qui est considéré comme risque compétitif.

Tableau 6. Comparaison synthétique des données d'entrées et équations des deux approches typiquement utilisées pour dériver l'ELR

	Approche dite simple	Approche par table de survie
Donnée d'entrée (« de fond »)	$P$ : taux de survenue de l'évènement d'intérêt dans une population non exposée (risque de fond vie entière), généralement standardisé sur l'âge	$T_i$ : taux de survenue de l'évènement d'intérêt dans une population non exposée dans la classe d'âge $i$ ; $M_i$ : taux de mortalité toutes causes confondues dans une population non exposée dans la classe d'âge $i$ ; $i$ allant typiquement de 1 à 84 ans par classes de 5 ans
Fonction concentration-risque	$RR$ issu d'une étude épidémiologique, exprimé en fonction d'un niveau d'exposition ; $RR = e^{(\beta \times Expo)}$ dans le cas d'une relation log-linéaire	$RR$ issu d'une étude épidémiologique, exprimé en fonction d'un niveau d'exposition ; $RR = e^{(\beta \times Expo)}$ dans le cas d'une relation log-linéaire
Excès de risque	$ELR_{extra-risque} = \frac{RR \times P - P}{1 - P}$	$R_0 = \sum_i P(T_i   \overline{M_{i-1}})$ : probabilité conditionnelle cumulée, tout au long de la vie, de survenue de l'évènement d'intérêt dans une population non exposée $R_X = \sum_i P(T_i   \overline{M_{i-1}}) \times RR$ : probabilité conditionnelle cumulée, tout au long de la vie, de survenue de l'évènement d'intérêt dans une population exposée $ELR = \frac{R_X - R_0}{1 - R_0}$
Adaptation décrémental	$ELR_{extra-risque\ décremental} = \frac{P - \frac{P}{RR}}{1 - \frac{P}{RR}}$	$R'_0 = \sum_i P(T_i   \overline{M_{i-1}})$ : probabilité conditionnelle cumulée, tout au long de la vie, de survenue de l'évènement d'intérêt dans la population générale exposée de manière ubiquitaire $R'_X = \sum_i P(T_i   \overline{M_{i-1}}) \times \frac{1}{RR}$ : probabilité conditionnelle cumulée, tout au long de la vie, de survenue de l'évènement d'intérêt avec l'effet de l'exposition ubiquitaire retirée $ELR_{décremental} = \frac{R'_0 - R'_X}{1 - R'_X}$

$ELR$  : excès de risque vie entière (excess lifetime risk) ;  $RR$  : risque relatif.

### 5.5.1.2 Calcul

A partir des fonctions concentration-risque extraites puis sélectionnées pour les différents événements de santé d'intérêt et selon l'approche retenue, plusieurs ELR ont été calculés et représentés sur une gamme de concentrations prédéfinie de  $0,55 \cdot 10^{-5}$  à  $12,50 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  (exprimées en absorbance). Les bornes de l'intervalle de confiance de l'ELR ont été calculées à partir des bornes de l'intervalle de confiance à 95 % de la fonction considérée.

La borne inférieure des concentrations prédéfinies pour représenter les ELR correspond à la conversion en « équivalent absorbance » (cf. chapitre 5.4.4) du minimum des concentrations de carbone suie observé en 2020 en France métropolitaine ( $0,50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  selon la Figure 5). La borne supérieure inclut la valeur maximale des concentrations moyennes annuelles observées en France métropolitaine en proximité d'infrastructures routières en 2019 ( $11,00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  selon la Figure 6). L'année 2020 n'a pas été exploitée pour définir la borne supérieure en raison des mesures de gestion liées à la crise sanitaire liée à la Covid-19, impactant à la baisse les concentrations à proximité du trafic routier.

Aucune extrapolation de la relation entre l'ELR et la concentration n'a été réalisée en dehors de la gamme prédéfinie car cette dernière est représentative de l'exposition de la population d'intérêt (France). Il faut également noter que les incertitudes aux concentrations les plus élevées au sein de cette gamme sont grandes car les études épidémiologiques examinant les risques associés à ces niveaux de concentrations sont peu nombreuses en Europe, ces dernières examinant généralement des concentrations de fond urbain.

Pour un même événement de santé, les courbes décrivant la relation entre ELR et concentration obtenues sur la base des différentes fonctions concentration-risque ont enfin été représentées sur le même graphique à des fins de comparaison. Parmi celles dont le niveau d'intérêt est le plus fort et de qualité jugée équivalente, **le GT a retenu la fonction la plus protectrice pour la santé (c'est-à-dire la courbe pour laquelle l'ELR est le plus élevé sur la gamme des concentrations ou sur la majeure partie de cette gamme) comme candidate pour l'étape suivante.**

## 5.5.2 Excès de risque journalier (EDR) (court terme)

L'excès de risque journalier (EDR, *excess daily risk*) correspond à la probabilité supplémentaire d'occurrence d'un événement sanitaire due à une exposition d'intérêt le jour même et/ou les quelques jours précédant cette occurrence, qui vient s'ajouter à la probabilité d'occurrence de l'événement non liée à cette exposition. Cet EDR est utilisé pour dériver la VTR court terme.

### 5.5.2.1 Approche

L'approche dite simple, décrite précédemment pour le calcul de l'excès de risque vie entière (ELR) (cf. chapitre 5.5.1), est applicable au calcul d'un excès de risque journalier (EDR). Il s'agit par ailleurs de la seule approche préconisée dans le guide de l'Anses pour l'élaboration de valeurs de référence pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions à court terme.

Les données nécessaires au calcul de l'EDR incluent P, risque de fond journalier de survenue d'un événement d'intérêt dans la population générale exposée de manière ubiquitaire au « carbone suie », et une fonction concentration-risque *RR* reliant un niveau d'exposition à la

survenue de l'évènement d'intérêt. Comme mentionné précédemment, l'adaptation décrémentation est appliquée en raison du caractère ubiquitaire de l'exposition d'intérêt.

$$EDR_{extra-risque\ décremental} = \frac{P - \frac{P}{RR}}{1 - \frac{P}{RR}}$$

Les données de fond correspondent à des taux de mortalité, d'hospitalisations ou de visites aux urgences attribués à une pathologie. Ces taux sont généralement standardisés sur l'âge. En complément des bases et références susmentionnées (cf. chapitre 5.5.1.1), des données supplémentaires ont été collectées pour des évènements de santé spécifiquement d'intérêt sur le court terme : les données de passages aux urgences pour asthme sur 2017-2019 du réseau Sursaud® de Santé Publique France et les données d'hospitalisations de la base PMSI-MCO<sup>24</sup> sur 2017-2019 communiqués par Santé Publique France.

### 5.5.2.2 Calcul

A partir des fonctions concentration-risque extraites puis sélectionnées pour les différents évènements de santé d'intérêt, plusieurs EDR ont été calculés en suivant l'approche dite simple et représentés sur une gamme de concentrations prédéfinie de carbone élémentaire allant de 0,20 à 15,00 µg.m<sup>-3</sup>. Les bornes de l'intervalle de confiance de l'EDR ont été calculées à partir des bornes de l'intervalle de confiance à 95 % de la fonction considérée.

Les bornes de concentrations considérées pour représenter les EDR correspondent aux minimum et maximum des concentrations moyennes journalières mesurées en France (métropolitaine), collectées dans le cadre de l'expertise de l'Anses (2018) pour la période 2012 à 2016 (Figure 10). La borne supérieure inclut notamment des maximas relatifs à la proximité d'infrastructures routières et à l'utilisation de la combustion de biomasse en hiver dans certaines régions (Figure 9 et Figure 10).

Aucune extrapolation de la relation entre l'EDR et la concentration n'a été réalisée en dehors de la gamme prédéfinie car cette dernière est représentative de l'exposition de la population d'intérêt (France) et est généralement considérée dans les études épidémiologiques sélectionnées.

Pour un même évènement de santé, les courbes décrivant la relation entre EDR et concentration obtenues sur la base des différentes fonctions concentration-risque ont enfin été représentées sur le même graphique à des fins de comparaison. **Parmi celles dont le niveau d'intérêt est le plus fort et de qualité jugée équivalente, le GT a retenu la fonction la plus protectrice pour la santé (c'est-à-dire la courbe pour laquelle l'EDR est le plus élevé sur la gamme des concentrations ou sur la majeure partie de cette gamme) comme candidate pour l'étape suivante.**

<sup>24</sup> PMSI-MCO : Programme de médicalisation des systèmes d'Information relative à l'activité de médecine, chirurgie, obstétrique et odontologie des établissements de santé

## 5.6 Détermination des valeurs candidates et des VTR

Pour chaque évènement de santé et chaque durée d'exposition, la fonction paramétrique décrivant la courbe de l'excès de risque (ELR pour le long terme ou EDR pour le court terme) candidat retenu à l'étape précédente a été dérivée et un excès de risque vie entière par unité de concentration, appelé excès de risque unitaire (ERU), a été calculé. L'ERU correspond à la pente de l'interpolation linéaire à l'origine issue de la fonction paramétrique décrivant l'excès de risque (ELR ou EDR) sur la gamme de concentration prédéfinie.

Le GT n'a pas appliqué d'extrapolation linéaire en dessous de la gamme de concentration prédéfinie pour dériver l'ERU car ces niveaux de concentrations ne sont quasiment pas observés en pratique en France, et les incertitudes sur les risques relatifs sont importantes à ces faibles concentrations.

**Pour chaque évènement de santé et chaque durée d'exposition, les ERU et fonctions paramétriques ainsi dérivés constituent l'ensemble des valeurs candidates aux VTR pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant. Les valeurs candidates sont présentées sous ces deux formes :**

- **une fonction décrivant la relation entre excès de risque (ELR pour le long terme ou EDR pour le court terme) et concentration (d'absorbance [Abs] pour le long terme et de carbone élémentaire pour le court terme) ;**
- **un ERU correspondant à la pente de l'interpolation linéaire à l'origine de cette fonction.**

Une analyse du niveau de confiance a ensuite été menée afin d'attribuer à ces valeurs candidates un score de confiance allant de 1 à 5 : faible (= 1), moyen (= 2 ou 3) ou fort (= 4 ou 5). La cotation du score a été proposée par un ou deux experts du GT, puis discutée avec l'ensemble du GT afin d'obtenir une cotation finale par consensus. Ce score de confiance répond aux recommandations du guide d'élaboration des VTR de l'Anses et prend en compte les aspects suivants : la nature et la qualité des données, l'hypothèse de construction, le choix de l'évènement de santé, le choix de l'étude clé, le choix de la fonction concentration-risque, les ajustements temporels ou allométriques réalisés, et la méthode appliquée pour le calcul de l'excès de risque.

**Les VTR recommandées par le GT pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant seront égales aux valeurs candidates (ERU) les plus protectrices pour la santé pour chacune des durées d'exposition (court terme et long terme séparément) et pour lesquelles :**

- **le niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque associée est le plus élevé,**
- **et le score de confiance dans l'ERU est parmi les plus élevés.**

## 6 Construction de la VTR court terme pour le « carbone suie »

Ce chapitre présente la dérivation des valeurs candidates à la VTR par voie respiratoire pour l'exposition à court terme au « carbone suie » dans les particules de l'air ambiant, selon les étapes de construction présentées dans le chapitre 5. Ce chapitre reprend et complète certains éléments obtenus lors du travail préparatoire visant à déterminer la faisabilité de construction de la VTR pour le « carbone suie » (Annexe 1).

**Seuls les résultats pour les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires** sont présentés dans les chapitres 6.1 à 6.4, car il s'agit de l'évènement de santé retenu *in fine* pour dériver la VTR (cf. chapitre 6.5). Les résultats pour les autres évènements de santé sont détaillés en Annexe 5. Les spécificités associées aux valeurs candidates et à la VTR sont décrites au chapitre 6.6.

### 6.1 Identification des évènements de santé d'intérêt

Plusieurs catégories d'effets sanitaires et évènements de santé ont été considérés comme potentiellement d'intérêt (Tableau 2), sur la base des conclusions de plusieurs rapports institutionnels (cf. chapitre 3.2).

Parmi eux, **le GT a retenu les évènements de santé listés dans le Tableau 7 comme d'intérêt pour construire la VTR court terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant**, car les niveaux de plausibilité d'un lien de causalité sont qualifiés de forts ou modérés par le GT sur la base des conclusions de rapports institutionnels récents (cf. chapitre 5.2).

### 6.2 Hypothèse de construction : sans seuil de concentration

**Au vu de l'ensemble des éléments détaillés précédemment (cf. chapitre 5.3), le GT a retenu l'hypothèse de l'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé pour le « carbone suie ».**

Brièvement, les études observationnelles en population générale examinant l'exposition aux PM montrent des effets sur la santé aux plus faibles concentrations, sans seuil discernable. Cette hypothèse répond au dernier cadre conceptuel des relations dose-réponse en évaluation des risques proposé par le NRC (2009), prenant en compte l'exposition de fond de la population générale et les facteurs de prédisposition individuels – et dont les PM sont un parfait exemple. Enfin, des études épidémiologiques récentes montrent de manière récurrente que les associations entre « carbone suie » et divers évènements de santé persistent à de faibles niveaux de concentrations. Toutefois, les données sont moins nombreuses pour les expositions à court terme.

Tableau 7. Catégories d'effets et indicateurs de santé retenus comme d'intérêt pour construire la VTR court terme pour le « carbone suie », selon les conclusions de OMS (2013), Anses (2019) et US EPA (2019)

Catégorie d'effets	Conclusions sur l'effet de l'exposition à court terme au « carbone suie » (BC, EC ou Abs) pour la catégorie d'effet			Indicateurs de santé (niveau de plausibilité du lien de causalité avec l'exposition à court terme au « carbone suie »)
	OMS (2013)	Anses (2019a)	US EPA (2019)	
<b>Santé respiratoire</b>	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Association positive (EC/BC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mortalité toutes causes respiratoires (<b>fort</b>)</li> <li>• Hospitalisations toutes causes respiratoires (<b>fort</b>) et de causes spécifiques (<b>modéré</b>) : asthme, BPCO, infections respiratoires</li> <li>• Asthme (déclenchement des symptômes, traitement) et sifflements (<b>fort</b>)</li> </ul>
<b>Santé cardio vasculaire</b>	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Association positive (EC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mortalité toutes causes cardiovasculaires (<b>fort</b>)</li> <li>• Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires (<b>fort</b>) et de causes spécifiques (<b>fort</b>) : maladie cardiaque ischémique, congestion cardiaque, infarctus et évènements coronariens, AVC</li> </ul>
<b>Mortalité toutes causes</b>	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Association positive (EC/BC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mortalité toutes causes non accidentelles (<b>fort</b>)</li> </ul>
<b>Hospitalisations toutes causes</b>	NA	Indication « forte » d'effets	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hospitalisations toutes causes non accidentelles (<b>fort</b>)</li> </ul>

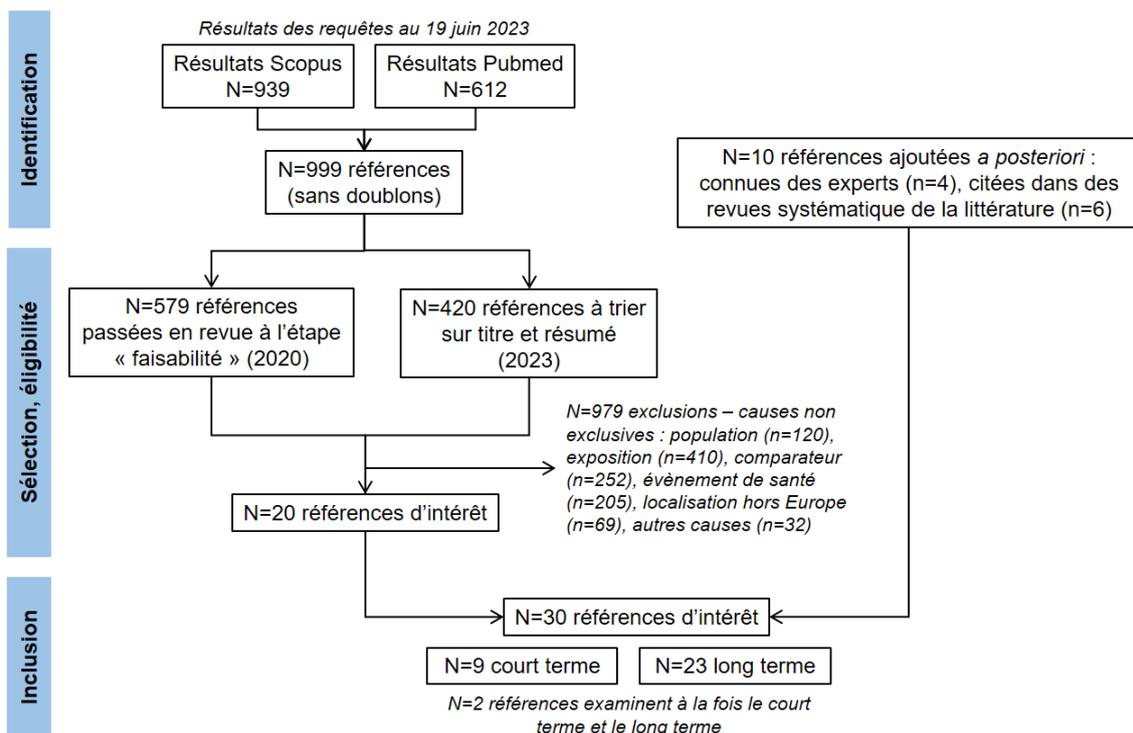
Abs : coefficient d'absorbance ; Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (France) ; AVC : accident vasculaire cérébral ; BC : carbone suie ; BPCO : broncho-pneumopathie chronique obstructive, EC : carbone élémentaire ; HEI : Health Effect Institute ; NA : non étudié ; OMS : Organisation mondiale de la santé ; US EPA : Agence de protection de l'environnement, États-Unis.

## 6.3 Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque

### 6.3.1 Recherche bibliographique et sélection des études

Après mise en commun des résultats issus des requêtes bibliographiques lancées en octobre 2022 (cf. chapitre 5.4.2), 999 publications sans doublon ont été identifiées. Cinq cents soixante-dix-neuf d'entre elles avaient précédemment été identifiées et triées lors de l'étude de faisabilité. Les 420 restantes ont été triées selon les critères et modalités décrits au chapitre 5.4.2. Au total, 20 publications étaient éligibles pour la construction d'une VTR pour le « carbone suie », tant à court terme que pour le long terme. A celles-ci ont été ajoutées 10 publications connues *a priori* des experts du GT ou citées dans des revues systématiques de la littérature mais non recensées par les recherches bibliographiques. Finalement, 30 publications ont été considérées d'intérêt dans les présents travaux (Figure 12).

**Parmi elles, 9 publications examinent l'exposition à court terme au « carbone suie » en lien avec l'un des événements de santé sélectionnés à l'étape précédente.** Les données descriptives de ces publications sont visibles en Annexe 4 : type d'analyse, nombre d'études incluses si méta-analyse ou analyse *poolée*, localisation géographique et événements de santé analysés.



Les requêtes bibliographiques ont été lancées pour la dernière fois le 19 juin 2023 (Annexe 3). Cependant, seules les références publiées jusqu'en octobre 2022 ont été considérées pour le long terme.

Figure 12. Diagramme de flux pour la sélection des études examinant l'exposition au « carbone suie »

### 6.3.2 Extraction des fonctions concentration-risque

Les fonctions concentration-risque (RR, OR ou HR) disponibles dans ces 9 publications ont été extraites pour tous les événements de santé d'intérêt selon les modalités décrites au chapitre 5.4.3. L'ensemble de ces fonctions est visible dans l'Annexe 4.

**Les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires étaient examinées dans quatre publications en lien avec une exposition à court terme au « carbone suie ».** Une description synthétique de ces publications est visible dans le Tableau 8.

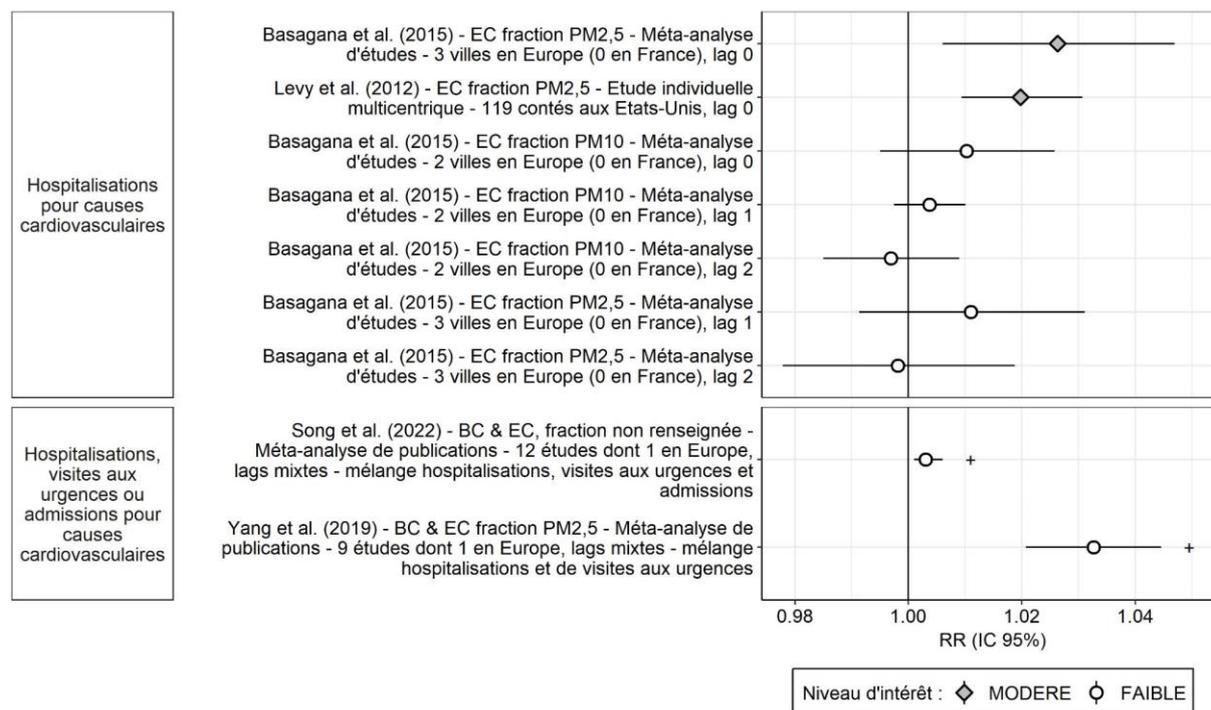
**Tableau 8. Description synthétique (par ordre alphabétique) des quatre publications identifiées pour les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires et l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires	(Basagaña <i>et al.</i> 2015)	Méta-analyse d'études Méta-analyse d'études dans 2 ou 3 villes en Espagne et en Italie. Hétérogénéité ( $I^2$ ) non renseignée. Métrique considérée : EC dans les fractions $PM_{10}$ et $PM_{2.5}$ . Plusieurs lags examinés pour chaque métrique, de 0 à 2. Ajustement sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Qualité de la méta-analyse forte selon outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine.
	(Levy <i>et al.</i> 2012)	Analyse multi-villes <i>poolée</i> Etude individuelle multicentrique dans 119 comtés des Etats-Unis. Métrique considérée : EC dans la fraction $PM_{2.5}$ . Seul le lag 0 a été examiné. Qualité de l'étude modérée selon outil WHO RoB, avec un risque de biais de confusion jugé élevé en raison de la non prise en compte de la saison. Les résultats sont similaires en analyses stratifiées sur la localisation (est vs. ouest des États-Unis).
	(Song <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications Douze publications incluses (dont 1 en Europe – Basagaña <i>et al.</i> 2015*), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité faible ( $I^2=29,7\%$ ) entre les études. Métriques considérées différentes selon les études (10 sur EC, 1 sur BC et 1 étude mixte) ainsi que différents lags. Les événements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34).
	(Yang <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de publications Neuf publications incluses (dont 1 en Europe– Basagaña <i>et al.</i> 2015*), identifiées par une revue de la littérature. Métriques considérées différentes selon les études (7 sur EC, 2 sur BC) ainsi que différents lags. Les événements de santé considérés sont hétérogènes entre les études : hospitalisations et/ou admissions hospitalières. Hétérogénéité ( $I^2$ ) nulle dans la méta-analyse. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34).

BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.  $I^2$  varie de 0 % (hétérogénéité nulle) à 100 % (forte hétérogénéité). \* L'inclusion de résultats issus d'une méta-analyse (telle que celle de Basagaña *et al.*) dans une autre méta-analyse (telles que celles de Yang *et al.* et Song *et al.*) est possible à partir du moment où les populations et/ou études incluses dans lesdites méta-analyses sont bien indépendantes.

Au sein de ces quatre publications, 13 fonctions concentration-risque ont été extraites. Parmi elles, les neuf fonctions issues des analyses considérées comme principales par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 13 ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 4. Aucune publication n'a caractérisé la forme non linéaire de la relation entre concentration et risque.

Les estimations centrales de risque issues des analyses principales sont majoritairement supérieures à 1, avec des valeurs comprises entre 1,003 et 1,033, bien que certaines associations ne soient pas statistiquement significatives (Figure 13).



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée. + Mélange de métriques. BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 13. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie »**

### 6.3.3 Analyse et sélection des fonctions concentration-risque

Parmi les 13 fonctions concentration-risque examinant les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie », le GT en a identifié deux présentant un intérêt « modéré » pour dériver une VTR, issues de deux publications, Basagaña *et al.* (2015) et Levy *et al.* (2012) (Figure 13).

Basagaña *et al.* (2015) est une méta-analyse de 3 villes en Europe considérée de qualité forte selon l'outil WHO RoB et présentant une association statistiquement significative pour le lag 0. Levy *et al.* (2012) est une analyse multicentrique *poolée*, considérée de qualité modérée selon l'outil WHO RoB. Elle inclut une large population et rapporte un risque de forte amplitude, mais a été réalisée aux Etats-Unis.

Les autres fonctions de Basagaña *et al.* (2015) ainsi que celles rapportées par Song *et al.* (2022) et Yang *et al.* (2019) présentent un niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR en raison de l'absence de mise en évidence d'une association statistiquement significative (Basagaña *et al.* 2015), du mélange de métriques limitant l'interprétation des résultats (Song *et al.* 2022 ; Yang *et al.* 2019) et de l'hétérogénéité des définitions des données de santé considérées dans les méta-analyses (Song *et al.* 2022 ; Yang *et al.* 2019).

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à court terme au « carbone suie » et les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires, le GT a identifié deux fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour**

dériver une VTR ; ces fonctions sont retenues pour la suite de la démarche. Elles sont issues de deux publications (Basagaña *et al.* 2015; Levy *et al.* 2012).

Le processus de sélection des fonctions concentration-risque pour les autres évènements de santé est présenté en Annexe 5.

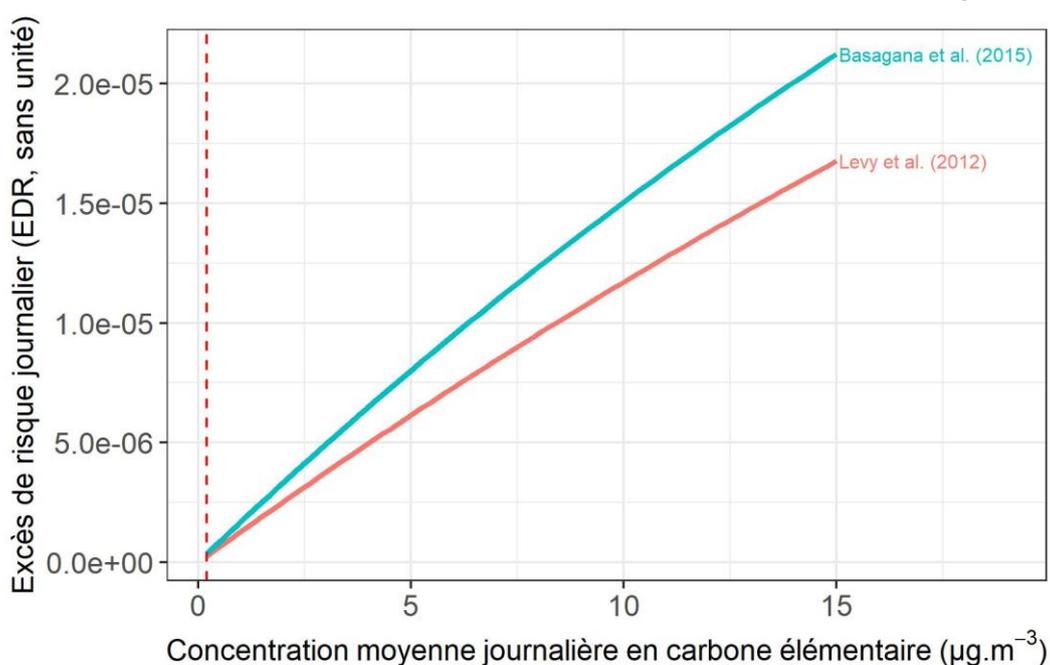
## 6.4 Calcul des excès de risque journalier (EDR)

### 6.4.1 Approche sélectionnée

L'approche dite « simple » avec une application décrémente a été utilisée pour calculer les EDR de l'ensemble des évènements de santé. C'est la seule approche parmi celles préconisées dans le guide de l'Anses pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions à court terme (cf. chapitre 5.5.2).

### 6.4.2 Calcul des excès de risque journalier selon différents niveaux de concentrations

Les EDR pour les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires, obtenus à partir des fonctions concentration-risque retenues précédemment, sont visibles dans la Figure 14.

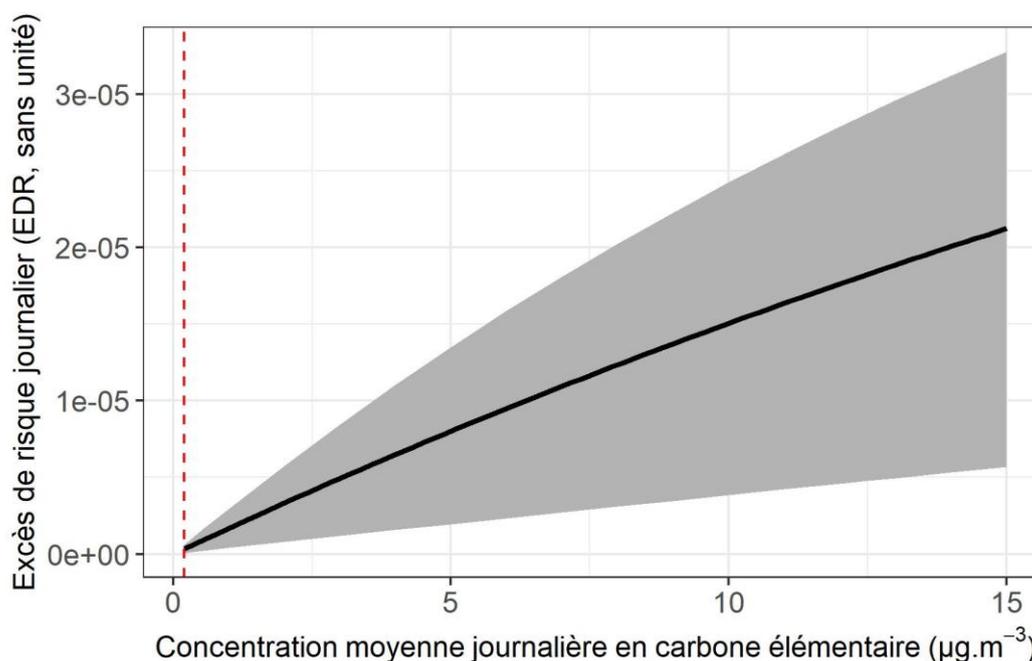


*Les fonctions supposent une relation log-linéaire.*

**Figure 14. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale) d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires en fonction des concentrations moyennes journalières en « carbone suie », exprimées en carbone élémentaire**

L'EDR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) pour la fraction  $\text{PM}_{2,5}$  et le *lag* 0, est le plus protecteur sur la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. De plus, l'étude de Basagaña *et al.* est considérée de bonne qualité par le GT compte tenu des faibles risques de biais et de la définition précise du nombre de jours de décalage entre exposition et évènement de santé.

Compte tenu de ces éléments, l'EDR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : hospitalisations toutes causes cardiovasculaires. L'EDR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 15.



*En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.*

**Figure 15. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'hospitalisations toutes causes cardiovasculaires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015)**

Les valeurs des excès de risque journalier pour les autres évènements de santé, ainsi que le processus de sélection de l'étude clé permettant le calcul de la valeur candidate pour ces évènements, sont présentés en Annexe 5.

Les données relatives aux résultats présentés dans le chapitre 6 et dans l'Annexe 5 sont disponibles sur demande à l'Anses<sup>25</sup>.

## 6.5 Détermination des valeurs candidates et de la VTR

Le Tableau 9 présente les valeurs candidates à la VTR, issue de la construction de la relation entre la concentration moyenne journalière en « carbone suie » (exprimée en EC) sur la gamme [0,2 – 15,0 µg.m<sup>-3</sup>] et l'excès de risque journalier.

Ces résultats ont été obtenus sur six évènements de santé pour lesquels le niveau de plausibilité du lien de causalité, ainsi que le niveau d'intérêt de la fonction concentration risque pour dériver une VTR, étaient suffisants. Les scores de confiance pour ces valeurs candidates, obtenus à partir d'une grille de cotation standardisée, sont relativement élevés (Annexe 6), notamment en comparaison des niveaux de confiance le plus souvent attribué lors de l'élaboration de VTR.

<sup>25</sup> Les demandes sont à adresser par message électronique à [vtr.particules@anses.fr](mailto:vtr.particules@anses.fr).

**Considérant les valeurs candidates obtenues (Tableau 9), la VTR court terme retenue par le GT pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant est l'excès de risque unitaire (ERU) des hospitalisations toutes causes cardiovasculaires de  $1,48.10^{-6} (\mu\text{g.m}^{-3})^{-1}$ .** Cette valeur est en effet la plus protectrice pour la santé parmi les valeurs candidates et pour laquelle i) une plausibilité de causalité modérée a été définie, ii) l'étude clé est de bonne qualité et examine des villes en Europe, iii) un niveau d'intérêt classé modéré pour dériver une VTR a été défini et iv) le score de confiance est élevé.

Tableau 9. Synthèse des valeurs candidates à l'élaboration de la VTR court terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

Évènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ [intervalle de confiance à 95 %] sur la gamme de concentration en carbone élémentaire de 0,2 à 15,0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ( $R^2$ )	Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'EDR en fonction de la concentration en carbone élémentaire [EC] de 0,2 à 15,0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
<i>Chapitres 5.2 et 6.1</i>	<i>Chapitres 5.2 et 6.1</i>	<i>Chapitres 5.4 et 6.3</i>	<i>Chapitres 5.4.5 et 6.3.3</i>	<i>Chapitres 5.5.1 et 6.4 et Annexe 5</i>	<i>Chapitres 5.5.1 et 6.4 et Annexe 5</i>	<i>Chapitres 5.6 et 6.5</i>
Hospitalisations toutes causes cardiovasculaires	Forte	Basagaña <i>et al.</i> (2015) <sup>A</sup>	Modéré	$1,48\cdot 10^{-6}$ [ $3,83\cdot 10^{-7}$ ; $2,35\cdot 10^{-6}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $1,48\cdot 10^{-6}$ x [EC]	Fort (4,5)
Hospitalisations toutes causes respiratoires	Forte	Basagaña <i>et al.</i> (2015) <sup>B</sup>	Modéré	$7,44\cdot 10^{-7}$ [ $2,96\cdot 10^{-8}$ ; $1,30\cdot 10^{-6}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $7,44\cdot 10^{-7}$ x [EC]	Fort (4,4)
Visites aux urgences pour asthme	Modérée	Bi <i>et al.</i> (2023) <sup>C</sup>	Modéré	$2,20\cdot 10^{-7}$ [ $6,01\cdot 10^{-8}$ ; $3,45\cdot 10^{-7}$ ] ( $R^2=0,99$ )	EDR = $2,20\cdot 10^{-7}$ x [EC]	Fort (4,4)
Mortalité toutes causes non accidentelles	Forte	Achilleos <i>et al.</i> (2017) <sup>D</sup>	Modéré	$7,61\cdot 10^{-8}$ [ $2,95\cdot 10^{-8}$ ; $1,21\cdot 10^{-7}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $7,61\cdot 10^{-8}$ x [EC]	Fort (4,2)
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Forte	Basagaña <i>et al.</i> (2015) <sup>E</sup>	Modéré	$3,06\cdot 10^{-8}$ [ $1,79\cdot 10^{-10}$ ; $5,72\cdot 10^{-8}$ ] ( $R^2=1,00$ )	EDR = $3,06\cdot 10^{-8}$ x [EC]	Fort (4,3)
Mortalité toutes causes respiratoires	Forte	Basagaña <i>et al.</i> (2015) <sup>F</sup>	Modéré	$2,22\cdot 10^{-8}$ [ $6,80\cdot 10^{-9}$ ; $3,35\cdot 10^{-8}$ ] ( $R^2=0,99$ )	EDR = $2,22\cdot 10^{-8}$ x [EC]	Fort (4,2)

A : carbone élémentaire dans la fraction  $PM_{2,5}$  sur lag 0. B : carbone élémentaire dans la fraction  $PM_{2,5}$  sur lag 1. C : carbone élémentaire sur lag cumulé 0-7, tous âges. D : mélange de carbone élémentaire et carbone suie, lags mixtes. E : carbone élémentaire dans la fraction  $PM_{10}$  sur lag 2. F : carbone élémentaire dans la fraction  $PM_{10}$  sur lag 1. \* La métrique EC est considérée pertinente car la majorité des études incluses dans la méta-analyse de Achilleos *et al.* (2017) examine cette métrique. EC : carbone élémentaire ; EDR : excès de risque journalier (excess daily risk) ; ERU : excès de risque unitaire ;  $R^2$  : coefficient de détermination de la droite de régression linéaire permettant de calculer l'ERU.

## 6.6 Spécificités des valeurs candidates et de la VTR court terme

Les valeurs candidates ainsi que la VTR court terme (Tableau 9) sont dérivées à partir d'études épidémiologiques de séries temporelles, réalisées en population et en situation d'exposition réelle. Cela présente de nombreux avantages car au plus proche de la situation réelle mais des spécificités d'usage sont également à considérer.

Tout d'abord, bien que ces valeurs s'expriment pour une concentration en « carbone suie », elles intègrent vraisemblablement d'autres composés ou aérosols présents dans les particules de l'air (péri-)urbain en raison des études épidémiologiques sur lesquelles elles se fondent – qui ne différencient pas forcément les effets individuels de ces composés ou aérosols. Néanmoins, le « carbone suie » est un indicateur universel d'un mélange variable de particules provenant d'une grande variété de sources de combustion. Ce mélange est donc représentatif de l'exposition réelle de la population à la pollution atmosphérique issue de ces sources.

La VTR recommandée, tout comme les valeurs candidates, s'appliquent à un ou à des groupes d'individus exposés à des concentrations d'exposition à court terme moyennées sur une zone d'étude. Cette approche est une conséquence directe de l'utilisation de séries temporelles pour le choix des études clés et des fonctions concentration-risque. En effet, la série temporelle (ou série chronologique) met en relation des données d'exposition et de santé indexées sur le temps à l'échelle d'une population ; l'analyse s'intéresse à la variation de ces données d'un instant à un autre. L'exposition y est généralement estimée par des moyennes journalières sur un territoire d'étude, à partir de concentrations mesurées en stations de fond. Les effets d'intérêt sont eux aussi journaliers.

Les valeurs candidates et la VTR se basent sur un risque de fond observé en France entière, ce qui peut les rendre moins pertinentes pour évaluer un excès de risque dans une population dont le risque de fond est sensiblement différent. A titre indicatif, des analyses de sensibilité par départements ont été réalisées dans l'expertise de l'Anses (2024) et les valeurs candidates restent du même ordre de grandeur.

De plus, toutes ces valeurs candidates sont élaborées selon une approche sans seuil de concentration pour des événements autres que le cancer. Cette approche, qui diverge de l'approche traditionnelle restreignant les effets sans seuil à des effets cancérigènes génotoxiques directs, repose ici sur les données épidémiologiques disponibles et reprend le concept proposé par le NRC (cf. chapitre 5.3).

Les valeurs candidates et la VTR sont développées pour une gamme de concentrations moyennes journalières en « carbone suie », exprimées en carbone élémentaire, comprises entre 0,2 et 15,0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Cette gamme inclut les concentrations généralement observées en France, y compris les niveaux observés en proximité d'infrastructures routières majeures. Au-delà de 15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , le niveau d'incertitude augmente en raison du peu d'études examinant ces niveaux de concentrations.

Les valeurs candidates considèrent la mortalité ou les hospitalisations comme événements de santé. Ce type d'évènement (par exemple, la mortalité de causes cardiovasculaires) inclut de fait diverses pathologies appartenant à une catégorie de santé (telles que AVC et infarctus). Les hospitalisations de causes cardiovasculaires, qui incluent l'ensemble des causes spécifiques, représentent donc un évènement intégrateur en termes de pathologies sous-jacentes. Il existe d'autres évènements, incluant des évènements infracliniques, pour lesquels des associations avec l'exposition au « carbone suie » sont observées, mais pour lesquels les données nécessaires à la construction d'une VTR ne sont pas disponibles en population.

## 7 Construction de la VTR long terme pour le « carbone suie »

Ce chapitre présente la dérivation des valeurs candidates à la VTR par voie respiratoire pour l'exposition à long terme au « carbone suie » dans les particules de l'air ambiant, selon les étapes de construction présentées dans le chapitre 5. Ce chapitre reprend et complète certains éléments obtenus lors du travail préparatoire visant à déterminer la faisabilité de construction de la VTR pour le « carbone suie » (Annexe 1).

Les résultats pour la mortalité toutes causes non accidentelles sont présentés dans les chapitres 7.1 à 7.4, car il s'agit de l'évènement de santé retenu *in fine* pour dériver la VTR long terme (cf. chapitre 7.5). Les résultats pour les autres évènements de santé sont détaillés en Annexe 8. Les spécificités associées aux valeurs candidates et à la VTR sont décrites au chapitre 7.6.

### 7.1 Identification des évènements de santé d'intérêt

Plusieurs catégories d'effets sanitaires et évènements de santé ont été considérés comme potentiellement d'intérêt (Tableau 2), sur la base des conclusions de plusieurs rapports institutionnels (cf. chapitre 3.2).

Parmi eux, **le GT a retenu les évènements de santé listés dans le Tableau 10 comme d'intérêt pour construire la VTR long terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant**, car les niveaux de plausibilité d'un lien de causalité sont qualifiés de forts ou modérés par le GT sur la base des conclusions de rapports institutionnels récents (cf. chapitre 5.2).

Tableau 10. Catégories d'effets et indicateurs de santé retenus comme d'intérêt pour construire la VTR long terme pour le « carbone suie », selon les conclusions de OMS (2013), Anses (2019), US EPA (2019) et HEI (2022)

Catégorie d'effets	Conclusions sur l'effet de l'exposition à long terme au « carbone suie » (BC, EC ou Abs) pour la catégorie d'effet				Indicateurs de santé (niveau de plausibilité du lien de causalité avec l'exposition à long terme au « carbone suie »)
	OMS (2013)	Anses (2019)	US EPA (2019)	HEI (2022)	
<b>Santé respiratoire</b>	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Association positive	Confiance faible chez les enfants	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité pour causes respiratoires (toutes causes et cause spécifique : BPCO) (<b>fort</b>)</li> <li>● Incidence de l'asthme chez l'enfant (<b>modéré</b>)</li> <li>● Incidence de l'asthme chez l'adulte, incidence de la BPCO (<b>modéré</b>)</li> </ul>
<b>Santé cardiovasculaire</b>	Preuves suffisantes	Indication « modérée » d'effets	Données limitées et discordantes	Confiance faible à modérée	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité pour causes cardiovasculaires (toutes causes et causes spécifiques : AVC, maladies coronariennes incluant infarctus, cardiopathie ischémique et cérébrovasculaire) (<b>modéré</b>)</li> <li>● Incidence de maladies coronariennes (incluant infarctus) et incidence d'AVC (<b>modéré</b>)</li> </ul>
<b>Mortalité toutes causes</b>	Preuves suffisantes	Indication « forte » d'effets	Association positive	Confiance forte	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Mortalité toutes causes non accidentelles (<b>fort</b>)</li> </ul>
<b>Santé périnatale</b>	NA	Indication « modérée » d'effets	Association positive	Confiance faible à modérée	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Petit poids de naissance (<b>modéré</b>)</li> </ul>

Abs : coefficient d'absorbance ; Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail ; AVC : accident vasculaire cérébral ; BC : carbone suie ; BPCO : broncho-pneumopathie chronique obstructive, EC : carbone élémentaire ; HEI : Health Effect Institute ; NA : non étudié ; OMS : Organisation mondiale de la santé ; US EPA : Agence de protection de l'environnement, Etats-Unis.

## 7.2 Hypothèse de construction : sans seuil de concentration

**Au vu de l'ensemble des éléments détaillés précédemment (cf. chapitre 5.3), le GT a retenu l'hypothèse de l'absence de seuil de concentration sans effet néfaste sur la santé pour le « carbone suie ».**

Brièvement, les études observationnelles en population générale examinant l'exposition aux PM montrent des effets sur la santé aux plus faibles concentrations, sans seuil discernable. Cette hypothèse répond au dernier cadre conceptuel des relations dose-réponse en évaluation des risques proposé par le NRC (2009), prenant en compte l'exposition de fond de la population générale et les facteurs de prédisposition individuels – et dont les PM sont un parfait exemple. Enfin, des études épidémiologiques récentes montrent de manière récurrente que les associations entre « carbone suie » et divers événements de santé persistent à de faibles niveaux de concentrations.

## 7.3 Choix des études clés fournissant des fonctions concentration-risque

### 7.3.1 Recherche bibliographique et sélection des études

Comme décrit précédemment (cf. chapitre 6.3.1), 30 publications sont d'intérêt dans les présents travaux (Figure 12). **Parmi elles, 23 publications examinent l'exposition à long terme au « carbone suie » en lien avec l'un des événements de santé sélectionnés à l'étape précédente.** Les données descriptives de ces publications sont visibles en Annexe 7 : type d'analyse, nombre d'études incluses si méta-analyse ou analyse *poolée*, localisation géographique et événements de santé analysés.

### 7.3.2 Extraction des fonctions concentration-risque

Les fonctions concentration-risque disponibles (RR, OR, HR ou modèles mathématiques non linéaires) dans ces 23 publications ont été extraites pour tous les événements de santé d'intérêt selon les modalités décrites au chapitre 5.4.3. L'ensemble de ces fonctions est visible dans l'Annexe 7.

**La mortalité toutes causes était examinée dans huit publications en lien avec une exposition à long terme au « carbone suie ».** Une description synthétique de ces publications est visible dans le Tableau 11. Le nombre de publications et de fonctions concentration-risque est le plus élevé pour la mortalité toutes causes.

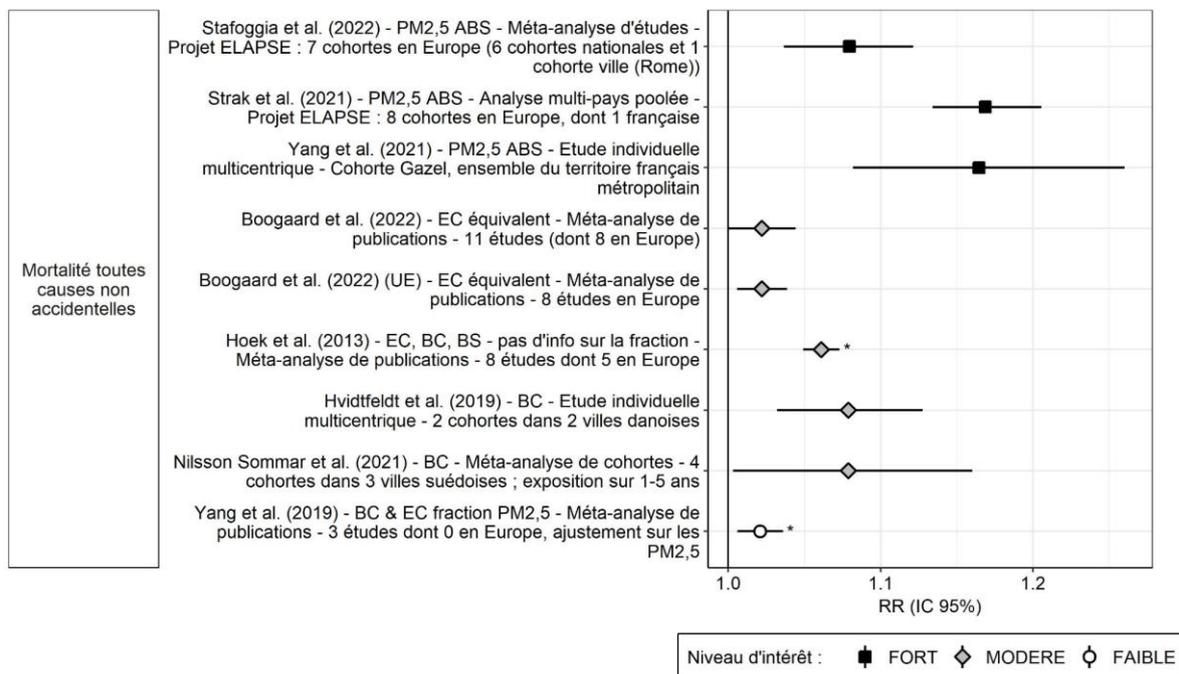
Tableau 11. Description synthétique (par ordre alphabétique) des huit publications identifiées pour la mortalité toutes causes non accidentelles et l'exposition à long terme au « carbone suie »

	Publication	Type d'analyse et description
Mortalité toutes causes non accidentelles	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications Onze publications (dont 8 en Europe) identifiées suite à une revue systématique de la littérature incluant une description de la qualité et des risques de biais. Les analyses de sensibilité (i. localisation Europe uniquement et ii. risque de biais faible à modéré uniquement) confirment les résultats obtenus dans l'analyse principale. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS. Une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Hétérogénéité substantielle entre les études ( $I^2 = 84\%$ dans l'analyse principale).
	(Hoek <i>et al.</i> 2013)	Méta-analyse de publications Huit publications dont 5 en Europe. L'évaluation de l'exposition est peu précise, à l'échelle de la ville uniquement. Les concentrations sont élevées dans certaines cohortes, probablement en lien avec les périodes de suivis anciennes. Les études incluses dans la méta-analyses examinent les métriques EC, BC et BS ; les auteurs n'ont pas appliqué de conversion préalable à la méta-analyse.
	(Hvidtfeldt <i>et al.</i> 2019)	Etude multicentrique Étude individuelle multicentrique incluant deux villes danoises. Population large (n=49 564). Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Suivi long de 1979 à 2015. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) pris en compte. Intérêt particulier des auteurs pour le rôle du bruit comme facteur de confusion de l'association entre pollution atmosphérique et santé.
	(Nilsson Sommar <i>et al.</i> 2021)	Méta-analyse de cohortes Méta-analyse de 4 études dans 3 villes suédoises. Population large (n=68 679). Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Faible hétérogénéité entre les études pour cet évènement de santé ( $I^2 < 28\%$ )
	(Stafoggia <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de cohortes Méta-analyse de 7 études de cohortes dans 7 pays européens, au sein du projet ELAPSE. Très forte hétérogénéité entre les études ( $I^2 = 98\%$ ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $< 3.10^{-5} m^{-1}$ ). Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition à Abs à l'adresse de résidence. Données de registres utilisées donc population très large (n=28 153 138). Standardisation des données entre pays.
	(Strak <i>et al.</i> 2021)	Analyse multi-pays poolée Analyse <i>poolée</i> de 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE, dont 1 cohorte française. Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $< 3.10^{-5} m^{-1}$ ). Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition.
	(Yang <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de publications Trois publications incluses, identifiées suite à une revue de la littérature ; liste détaillée des études incluses dans la méta-analyse non fournie par les auteurs. Seuls les résultats incluant un ajustement sur la masse totale des PM <sub>2,5</sub> sont inclus dans la méta-analyse. Les études incluses dans la méta-analyses examinent les métriques EC et BC ; les auteurs n'ont pas appliqué de conversion. Hétérogénéité entre les études non disponible.

Publication	Type d'analyse et description
(Yang <i>et al.</i> 2021)	Étude multicentrique Étude individuelle multicentrique en France (cohorte Gazel, n=19 906). Long suivi des participants (1989-2017). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition. Nombreux facteurs de confusion. Une analyse spécifique a été menée pour tenter de différencier les effets de l'exposition au carbone suie (Abs) de ceux des PM en masse sur le risque.

Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; PM : particulate matter ; Gazel : cohorte de volontaires d'Electricité de France et de Gaz de France.

Au sein de ces huit publications, 23 fonctions concentration-risque ont été extraites. Les fonctions issues de résultats considérés principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 16 ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 7. Pour permettre les comparaisons, les RR ont été convertis en équivalent-absorbance quand il était possible de le faire, puis standardisés pour un même incrément de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  (cf. chapitre 5.4.4).



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. \* Les risques n'ont pas pu être convertis en équivalent-abs car un mélange de métriques était utilisé par les auteurs, sans possibilité de transformation ; le risque est alors exprimé pour un incrément de  $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

**Figure 16. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de mortalité toutes causes non accidentelles pour une augmentation de  $1.10^{-5}$  de l'exposition à long terme au « carbone suie »**

Les estimations centrales de risque issues des analyses principales sont toutes supérieures à 1, avec des valeurs comprises entre 1,02 et 1,17 ; la majorité des associations sont statistiquement significatives (Figure 16). Les valeurs des estimations de Strak *et al.* (2021) et Yang *et al.* (2021) sont plus élevées que les autres, possiblement en lien avec les types d'analyses et de données (individuelles), les populations (âge, sexe, environnements), le degré d'ajustement sur les facteurs de confusion ou les modèles d'estimation de l'exposition.

Trois publications ont caractérisé la forme non linéaire de la relation concentration-risque (Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021). Pour cela, les deux premières exploitent la classe de modèles SCHIF (*shape constrained health impact function*) tandis que Yang *et al.* (2021) ont appliqué une fonction *spline* cubique.

### 7.3.3 Analyse et sélection des fonctions concentration-risque

Parmi les 23 fonctions concentration-risque examinant la mortalité toutes causes en lien avec l'exposition à long terme au « carbone suie », le GT en a identifié trois présentant un intérêt « fort » pour dériver une VTR et 14 présentant un intérêt « modéré ». Certaines d'entre elles (n=6) sont issues d'analyses secondaires aux résultats principaux de Strak *et al.* (2021) et Stafoggia *et al.* (2022) pour lesquels un intérêt « fort » a été défini (Figure 16) ; les résultats principaux ont été privilégiés car présentant une caractérisation non linéaire de la relation. Parmi les deux fonctions extraites de Boogaard *et al.* (2022), celle issue de l'analyse secondaire n'incluant que des localisations européennes a été privilégiée par la suite car elle est supposée plus représentative de la population cible (française) et elle présente un intervalle de confiance plus réduit autour de l'estimation centrale du risque.

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à long terme au « carbone suie » et la mortalité toutes causes, le GT a identifié sept fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR ; ces fonctions sont retenues pour la suite de la démarche. Elles sont issues de sept publications (Boogaard *et al.* 2022; Hoek *et al.* 2013; Hvidtfeldt *et al.* 2019; Nilsson Sommar *et al.* 2021; Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021). Elles incluent toutes des localisations européennes, parfois strictement européennes (Boogaard *et al.* 2022; Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021), voire françaises (Yang *et al.* 2021). Trois publications disposent d'une estimation de la forme non linéaire de la relation entre concentration et risque (Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021).**

Le processus de sélection des fonctions concentration-risque pour les autres évènements de santé est présenté en Annexe 8.

## 7.4 Calcul des excès de risque vie entière (ELR)

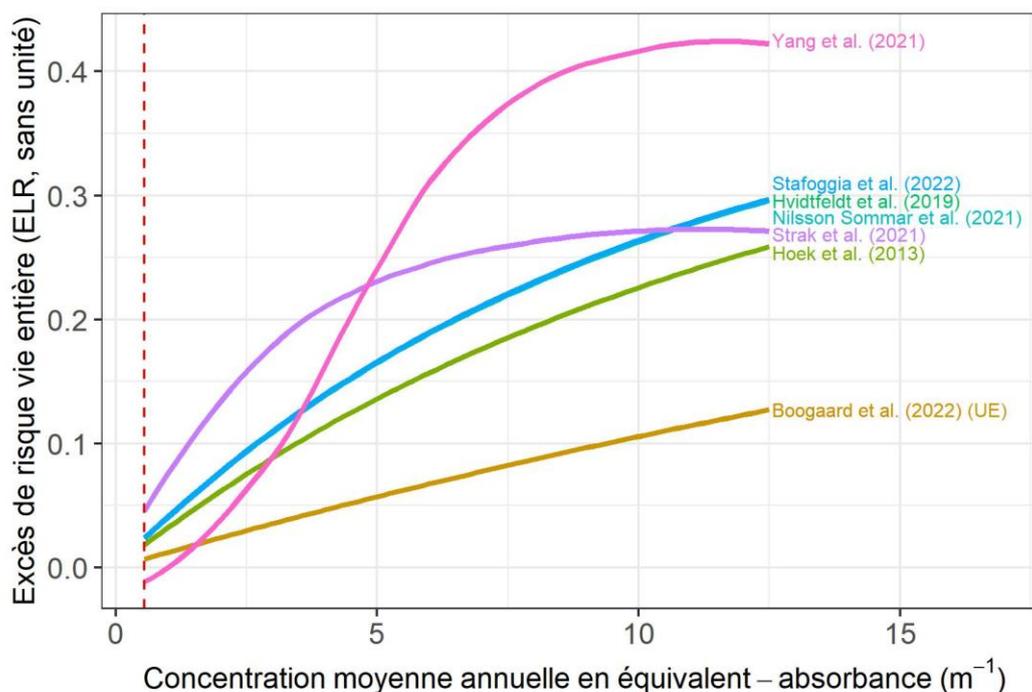
### 7.4.1 Approche sélectionnée

**Compte tenu des données sur le risque de fond disponibles par classe d'âge pour les décès toutes causes, l'approche par table de survie décrémentationale a été utilisée pour cet évènement de santé.**

L'approche utilisée pour chacun des autres évènements de santé est présentée en Annexe 8.

### 7.4.2 Calcul des excès de risque vie entière selon différents niveaux de concentrations

Les valeurs des ELR pour la mortalité toutes causes, obtenues à partir des sept fonctions concentration-risque retenues précédemment, sont visibles dans la Figure 17.



Deux fonctions intègrent la forme non-linéaire de la relation entre concentration et risque (Strak et al. 2021; Yang et al. 2021) ; les autres supposent une relation log-linéaire. Les fonctions concentration-risque ont été converties en équivalent-abs quand c'était possible (cf. chapitre 5.4.4) ; seule la fonction de Hoek et al. (2013) n'a pas pu être convertie. Trois fonctions présentent les mêmes estimations centrales donc les ELR correspondants se chevauchent sur la figure (Hvidtfeldt et al. 2019; Nilsson Sommar et al. 2021; Stafoggia et al. 2022).

**Figure 17. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) de décès toutes causes non accidentelles en fonction des concentrations moyennes annuelle en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

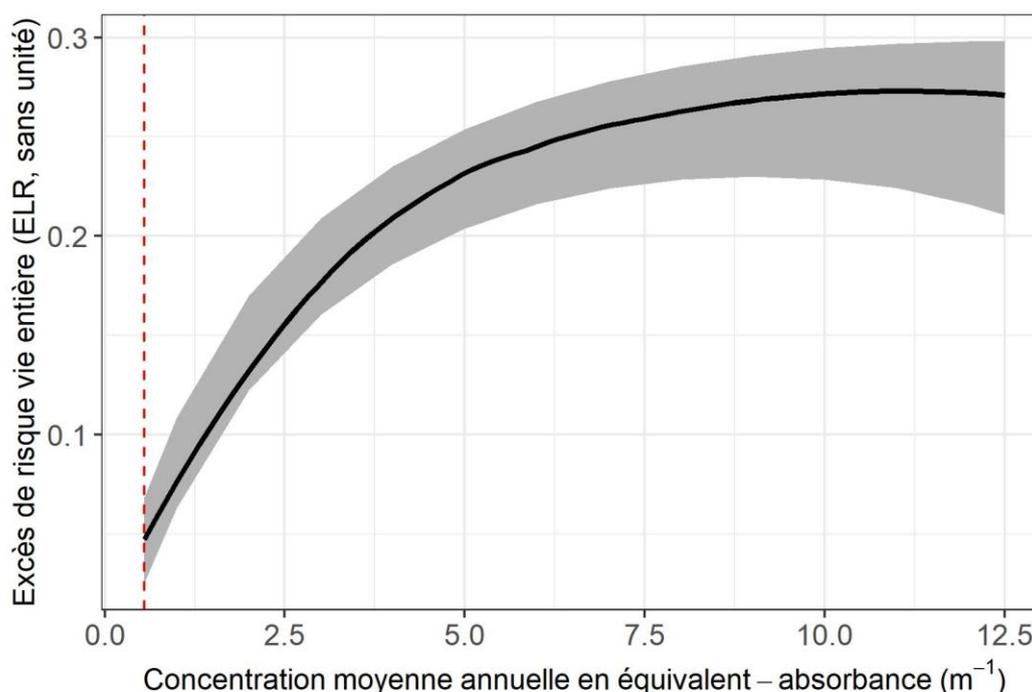
Deux ELR intègrent la forme non-linéaire de la relation entre concentration et risque (Strak et al. 2021; Yang et al. 2021) ; les autres supposent une relation log-linéaire.

L'ELR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de risque de Strak et al. (2021) est le plus protecteur pour la santé sur la première partie de la gamme de concentrations ( $\leq 5.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ), qui sont les plus fréquemment rencontrées en zone urbaine en France (cf. chapitre 2.4.2.2). La forme non linéaire de la relation entre exposition au « carbone suie » et risque de décès toutes causes y est en outre incluse et ce, pour des populations exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $\leq 3.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ). En contrepartie, il est à noter que cela implique une extrapolation de la fonction concentration-risque à des niveaux supérieurs. De plus, l'analyse de Strak et al. (2021) ne considère que des cohortes européennes, permettant une bonne transposabilité de la fonction à la population française. Enfin, cette analyse est considérée de bonne qualité par les experts du GT grâce à la standardisation des données individuelles entre cohortes, les degrés d'ajustement sur les facteurs de confusion et la modélisation sophistiquée de l'exposition (résolutions spatiale et temporelle fines) présentant de bonnes performances de prédiction.

Il est à noter que l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Yang et al. (2021) est le plus protecteur pour une population exposée à des concentrations annuelles plus élevées ( $\geq 5.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ). De telles valeurs sont représentatives de situations spécifiques et ponctuelles (proximité d'infrastructures routières avec un trafic important par exemple).

De manière générale, de plus grandes incertitudes sont attendues autour des ELR dérivés sur des gammes de concentrations  $\geq 8.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , car ces dernières ne sont que peu représentées dans les études épidémiologiques décrivant des fonctions concentration-risque.

Compte tenu de ces éléments, l'ELR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité toutes causes non accidentelles. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 18.



*En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.*

**Figure 18. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes non accidentelles en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021)**

Les valeurs des excès de risque vie entière pour les autres évènements de santé, ainsi que le processus de sélection de l'étude clé permettant le calcul de la valeur candidate pour ces évènements, sont présentés en Annexe 8.

Les données relatives aux résultats présentés dans le Chapitre 7 et dans l'Annexe 8 sont disponibles sur demande à l'Anses<sup>26</sup>.

## 7.5 Détermination des valeurs candidates et de la VTR

Le Tableau 12 présente les valeurs candidates à la VTR, issue de la construction de la relation entre la concentration moyenne annuelle en « carbone suie » (exprimée en équivalent-absorbance) sur la gamme  $[0,55.10^{-5} - 12,5.10^{-5} \text{ m}^{-1}]$  et l'excès de risque vie entière (ELR).

Ces résultats ont été obtenus sur neuf évènements de santé pour lesquels le niveau de plausibilité du lien de causalité, ainsi que le niveau d'intérêt de la fonction concentration risque pour dériver une VTR, étaient suffisants. Les scores de confiance dans ces valeurs

<sup>26</sup> Les demandes sont à adresser par message électronique à [vtr.particules@anses.fr](mailto:vtr.particules@anses.fr).

candidates, obtenus à partir d'une grille de cotation standardisée, sont relativement élevés (Annexe 9).

Pour certains évènements de santé, deux ERU sont présentés sur les intervalles  $[0,55.10^{-5} - 5,00.10^{-5} \text{ m}^{-1}]$  et  $]5,00.10^{-5} - 12,50.10^{-5} \text{ m}^{-1}]$  de concentration en « carbone suie » (exprimée en équivalent-absorbance) et ce, en raison de la forme supra-linéaire de la relation entre la concentration et l'ELR et d'un coefficient de détermination ( $R^2$ ) inférieur à 0,80 pour la droite de régression linéaire sur la gamme complète.

**Considérant les valeurs candidates obtenues (Tableau 12), la VTR long terme retenue par le GT pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant est l'ERU de la mortalité toutes causes non accidentelles de  $5,29.10^{-2} (\text{m}^{-1})^{-1}$  et la fonction paramétrique associée  $\text{ELR} = 2,86.10^{-4} \times [\text{abs}]^3 - 8,24.10^{-3} \times [\text{abs}]^2 + 8,00.10^{-2} \times [\text{abs}] + 4,49.10^{-3}$ .** Cette valeur est en effet la plus protectrice pour la santé parmi les valeurs candidates et pour laquelle i) une plausibilité de causalité forte a été définie, ii) l'étude clé est de bonne qualité et examine 8 études de cohortes en Europe (incluant une cohorte française), iii) un niveau d'intérêt fort pour dériver une VTR a été défini et iv) le score de confiance dans l'ERU est élevé.

Tableau 12. Synthèse des valeurs candidates à l'élaboration de la VTR long terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en (m <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> [intervalle de confiance à 95%] sur la gamme de concentration en équivalent-absorbance déterminée (R <sup>2</sup> )		Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'ELR en fonction de la concentration en équivalent-absorbance [abs] de 0,55.10 <sup>-5</sup> à 12,50.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)
<i>Chapitres 5.2 et 7.1</i>	<i>Chapitres 5.2 et 7.1</i>	<i>Chapitres 5.4 et 7.3</i>	<i>Chapitres 5.4.5 et 7.3.3</i>	<i>Chapitres 5.5.1 et 7.4.2 et Annexe 8</i>		<i>Chapitres 5.5.1 et 7.4.2 et Annexe 8</i>	<i>Chapitres 5.6 et 7.5</i>
Incidence de l'asthme chez l'adulte	Modérée	Liu <i>et al.</i> (2021a)	Modéré	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 5,00.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 6,79.10 <sup>-2</sup> [4,85.10 <sup>-2</sup> ; 7,98.10 <sup>-2</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,82)	*De 5,00.10 <sup>-5</sup> à 12,50.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 8,14.10 <sup>-3</sup> [abs] + 2,66.10 <sup>-1</sup> [1,35.10 <sup>-2</sup> [abs] + 1,65.10 <sup>-1</sup> ; 4,15.10 <sup>-3</sup> [abs] + 3,20.10 <sup>-1</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,91)	ELR = -4,00.10 <sup>-5</sup> x [abs] <sup>4</sup> + 1,39.10 <sup>-3</sup> x [abs] <sup>3</sup> - 1,86.10 <sup>-2</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 1,23.10 <sup>-1</sup> x [abs]	Modéré (3,9)
Mortalité toutes causes non accidentelles	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 5,00.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 5,29.10 <sup>-2</sup> [4,64.10 <sup>-2</sup> ; 6,01.10 <sup>-2</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,87)	*De 5,00.10 <sup>-5</sup> à 12,50.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 5,09.10 <sup>-3</sup> [abs] + 2,15.10 <sup>-1</sup> [5,91.10 <sup>-4</sup> [abs] + 2,15.10 <sup>-1</sup> ; 5,50.10 <sup>-3</sup> [abs] + 2,36.10 <sup>-1</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,82)	ELR = 2,86.10 <sup>-4</sup> x [abs] <sup>3</sup> - 8,24.10 <sup>-3</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 8,00.10 <sup>-2</sup> x [abs] + 4,49.10 <sup>-3</sup>	Fort (4,6)
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Modérée	Yang <i>et al.</i> (2021)	Modéré	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 5,00.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 1,54.10 <sup>-2</sup> [-1,11.10 <sup>-2</sup> ; 2,23.10 <sup>-2</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,92)	*De 5,00.10 <sup>-5</sup> à 12,50.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 2,94.10 <sup>-3</sup> [abs] + 5,80.10 <sup>-2</sup> [-2,24.10 <sup>-2</sup> [abs] + 6,26.10 <sup>-2</sup> ; 6,08.10 <sup>-4</sup> [abs] + 9,00.10 <sup>-2</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,94)	ELR = 5,77.10 <sup>-5</sup> x [abs] <sup>3</sup> - 1,84.10 <sup>-3</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 2,12.10 <sup>-2</sup> x [abs] + 2,17.10 <sup>-3</sup>	Fort (4,2)
Incidence d'AVC	Modérée	Wolf <i>et al.</i> (2021)	Modéré	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 12,50. 10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 5,94.10 <sup>-3</sup> [3,62.10 <sup>-3</sup> ; 8,24.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,65)		ELR = 3,46.10 <sup>-5</sup> x [abs] <sup>3</sup> - 1,08.10 <sup>-3</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 1,29.10 <sup>-2</sup> x [abs] + 1,65.10 <sup>-3</sup>	Fort (4,1)
Petit poids de naissance	Modérée	Pedersen <i>et al.</i> (2013)	Modéré	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 12,50. 10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 5,42.10 <sup>-3</sup> [-4,99.10 <sup>-3</sup> ; 6,75.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,81)		ELR = 1,88.10 <sup>-5</sup> x [abs] <sup>3</sup> - 6,98.10 <sup>-4</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 1,03.10 <sup>-2</sup> x [abs] + 4,83.10 <sup>-4</sup>	Fort (4,2)
Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Modérée	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 12,50. 10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 2,15.10 <sup>-3</sup> [1,29.10 <sup>-3</sup> ; 2,46.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,90)		ELR = 2,34.10 <sup>-6</sup> x [abs] <sup>3</sup> - 1,90.10 <sup>-4</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 3,96.10 <sup>-3</sup> x [abs] - 1,42.10 <sup>-3</sup>	Fort (4,4)

Evènement de santé	Plausibilité du lien de causalité	Référence clé retenue	Niveau d'intérêt pour dériver une VTR	Valeur de l'ERU en (m <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> [intervalle de confiance à 95%] sur la gamme de concentration en équivalent-absorbance déterminée (R <sup>2</sup> )	Fonction paramétrique décrivant la valeur de l'ELR en fonction de la concentration en équivalent-absorbance [abs] de 0,55.10 <sup>-5</sup> à 12,50.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	Niveau de confiance dans l'ERU (/5)	
Chapitres 5.2 et 7.1	Chapitres 5.2 et 7.1	Chapitres 5.4 et 7.3	Chapitres 5.4.5 et 7.3.3	Chapitres 5.5.1 et 7.4.2 et Annexe 8	Chapitres 5.5.1 et 7.4.2 et Annexe 8	Chapitres 5.6 et 7.5	
Mortalité toutes causes respiratoires	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 12,50. 10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 1,90.10 <sup>-3</sup> [1,13.10 <sup>-3</sup> ; 2,29.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,74)	ELR = 1,06.10 <sup>-5</sup> x [abs] <sup>3</sup> – 3,31.10 <sup>-4</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 4,07.10 <sup>-3</sup> x [abs] + 8,87.10 <sup>-5</sup>	Fort (4,3)	
Mortalité de cause BPCO	Forte	Strak <i>et al.</i> (2021)	Fort	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 5,00.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 1,40.10 <sup>-3</sup> [5,53.10 <sup>-4</sup> ; 1,86.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,94)	*De 5,00.10 <sup>-5</sup> à 12,50.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 3,16.10 <sup>-4</sup> [abs] + 5,12.10 <sup>-3</sup> [3,52.10 <sup>-4</sup> [abs] + 1,03.10 <sup>-3</sup> ; 1,57.10 <sup>-4</sup> [abs] + 7,55.10 <sup>-3</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,95)	ELR = 4,62.10 <sup>-6</sup> x [abs] <sup>3</sup> – 1,54.10 <sup>-4</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 1,90.10 <sup>-3</sup> x [abs] + 1,41.10 <sup>-4</sup>	Fort (4,3)
Incidence de l'asthme de l'enfant	Modérée	Gehring <i>et al.</i> (2015)	Fort	De 0,55.10 <sup>-5</sup> à 12,50. 10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> : 8,03.10 <sup>-4</sup> [0,00 ; 9,01.10 <sup>-4</sup> ] (R <sup>2</sup> =0,55)	ELR = 5,09.10 <sup>-6</sup> x [abs] <sup>3</sup> – 1,62.10 <sup>-4</sup> x [abs] <sup>2</sup> + 1,86.10 <sup>-3</sup> x [abs] + 1,83.10 <sup>-4</sup>	Fort (4,6)	

[abs] : valeur de concentrations moyenne annuelle en absorbance ; AVC : accident vasculaire cérébral ; BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive ; ELR : excès de risque vie entière (excess lifetime risk) ; ERU : excès de risque unitaire ; R<sup>2</sup> : coefficient de détermination de la droite de régression linéaire permettant de calculer l'ERU. \* L'ERU intègre une constante sur la gamme [5,00.10<sup>-5</sup> ; 12,50.10<sup>-5</sup>] en raison de la linéarisation par morceaux de la fonction ELR-concentration.

## 7.6 Spécificités des valeurs candidates et de la VTR long terme

L'ensemble des valeurs candidates ainsi que la VTR long terme (Tableau 12) sont dérivées à partir d'études épidémiologiques réalisées en population et en situation d'exposition réelle. Cela présente de nombreux avantages car au plus proche de la situation réelle mais des spécificités d'usage sont également à considérer.

Tout d'abord, bien que ces valeurs s'expriment pour une concentration en « carbone suie », elles intègrent vraisemblablement d'autres composés ou aérosols présents dans les particules de l'air (péri-)urbain en raison des études épidémiologiques sur lesquelles elles se fondent – qui ne différencient pas forcément les effets individuels de ces composés ou aérosols. Néanmoins, le « carbone suie » est un indicateur universel d'un mélange variable de particules provenant d'une grande variété de sources de combustion. Ce mélange est donc représentatif de l'exposition réelle de la population à la pollution atmosphérique issue de ces sources.

Les valeurs candidates se basent sur un risque de fond (taux de mortalité ou d'incidence de l'évènement de santé) observé en France entière, ce qui peut les rendre moins pertinentes pour évaluer un excès de risque dans une population dont le risque de fond est sensiblement différent. A titre indicatif, des analyses de sensibilité par départements ont été réalisées dans Anses (2024) et les valeurs candidates restent du même ordre de grandeur.

Certaines valeurs candidates sont dérivées de fonctions concentration-risque développées chez les adultes et prennent en compte le taux de mortalité de la naissance à 84 ans. Elles ne doivent donc pas être utilisées pour évaluer le risque sanitaire d'une exposition prénatale ou durant l'enfance uniquement. D'autres valeurs candidates peuvent être utilisées pour ce type d'expositions, car elles considèrent des événements de santé incidents chez l'enfant (asthme) et le nouveau-né (faible poids de naissance).

De plus, toutes ces valeurs candidates sont élaborées selon une approche sans seuil de concentration pour des événements autres que le cancer. Cette approche, qui diverge de l'approche traditionnelle restreignant les effets sans seuil à des effets cancérogènes génotoxiques directs, repose ici sur les données épidémiologiques disponibles et reprend le concept proposé par le NRC (cf. chapitre 5.3).

Les valeurs candidates sont développées pour une gamme de concentrations moyennes annuelles en « carbone suie », exprimées en équivalent-absorbance et comprises entre  $0,55 \cdot 10^{-5}$  et  $12,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ . Cette gamme inclut les concentrations généralement observées en France, y compris les niveaux observés en proximité d'infrastructures routières majeures. Au-delà de  $12,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , le niveau d'incertitude augmente en raison du peu d'études examinant ces niveaux de concentrations.

Plusieurs valeurs candidates utilisent la mortalité comme événement de santé. Ce type d'évènement (par exemple, la mortalité cardiovasculaire) inclut de fait diverses pathologies appartenant à une catégorie de santé (telles que AVC et infarctus). La mortalité toutes causes non accidentelles, qui inclut toutes les causes spécifiques, représente donc un événement intégrateur en termes de pathologies sous-jacentes.

Il existe d'autres événements, incluant des événements infracliniques, pour lesquels des associations avec l'exposition au « carbone suie » sont observées, mais qui restent insuffisamment documentées à l'heure actuelle ou pour lesquels les données nécessaires à la construction d'une VTR ne sont pas disponibles. Néanmoins, les valeurs candidates sont

développées ici pour une large gamme d'évènements de santé pour lesquels le niveau de causalité et les données quantitatives sont suffisants pour dériver une VTR.

Enfin, ces valeurs candidates sont exprimées sous la forme d'un ERU et d'une fonction paramétrique. L'ERU constitue l'expression traditionnelle des VTR sans seuil mais la fonction paramétrique est par construction plus précise que l'ERU. En particulier, l'utilisation de l'ERU pour les décès toutes causes non accidentelles sur des concentrations moyennes annuelles de « carbone suie » supérieures à  $5.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  surestime le risque. Cette approche, simple d'utilisation, est donc plus protectrice pour la santé.

## 8 Conclusions

Les VTR recommandées pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant sont présentées dans ce chapitre. Pour rappel, le terme « carbone suie » est utilisé comme un terme générique pour désigner l'ensemble des métriques d'intérêt : le carbone suie, le carbone élémentaire et le coefficient d'absorption (absorbance).

**Il est important de noter que ces VTR (court terme et long terme) pour le « carbone suie » sont à utiliser séparément et que les résultats de leur application doivent être interprétés de manière indépendante.** Les effets à long terme englobent probablement une partie d'effets à court terme et inversement et ce, sans possibilité de les différencier.

**De même, les VTR pour le « carbone suie » sont à utiliser séparément des VTR pour les particules (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) de l'air ambiant.** Ces dernières concernent en effet les particules en général, incluant de fait du « carbone suie » et d'autres composés ou aérosols. Le « carbone suie » présente l'avantage d'être un indicateur universel de particules provenant de diverses sources de combustion, rendant l'utilisation de ses VTR complémentaires à celles des particules totales.

### 8.1 VTR court terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

Plusieurs fonctions concentration-excès de risque journalier (EDR) et ERU candidats ont été dérivés pour les effets aigus néfastes pour la santé humaine présentant des niveaux du lien de causalité élevés avec l'exposition à court terme au « carbone suie » (Tableau 9). Parmi eux, le GT et le CES recommandent l'utilisation de l'ERU fondé sur les hospitalisations pour causes cardiovasculaires présenté dans le Tableau 13. Un niveau de confiance fort a été attribué à cette VTR.

Tableau 13. VTR court terme par voie respiratoire pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

Effet (étude clé)	Fonction Concentration-Excès de risque ou concentration(s) équivalente(s)	VTR court terme (exprimée en carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>2,5</sub> )
Hospitalisations pour causes cardiovasculaires  (Basagaña <i>et al.</i> (2015) : méta-analyse d'études dans 3 villes en Espagne et en Italie, carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>2,5</sub> , lag 0)	Variation relative du risque (%change)	ERU = 1,48.10 <sup>-6</sup> (µg.m <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>
		Niveau de confiance : Fort

ERU : excès de risque unitaire.

La VTR court terme pour le « carbone suie » peut être utilisée en complément (sans addition des résultats) de la VTR court terme pour les particules de l'air ambiant (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>) en présence d'une pollution particulaire issue d'un processus de combustion tel que le trafic routier et le chauffage au bois.

La VTR a été dérivée pour des concentrations moyennes journalières de « carbone suie » exprimé en carbone élémentaire, ce dernier étant la métrique utilisée dans l'étude clé et la

plus représentée dans les études épidémiologiques recensées. Le cas échéant, le GT et le CES rappellent qu'il existe des facteurs de conversion permettant de convertir les concentrations entre les trois métriques du « carbone suie » (absorbance, carbone suie et carbone élémentaire) (cf. chapitre 2.3.4). Ces facteurs pouvant varier dans le temps et l'espace, il est recommandé d'utiliser, si disponible, un facteur de conversion propre à la méthode de mesure utilisée, à la zone géographique évaluée et à la période de temps considérée.

Des ERU ont également été élaborés pour d'autres événements de santé en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » des particules de l'air ambiant (cf. chapitre 6.5). Ils peuvent être utilisés au même titre qu'une VTR dans le cadre d'une évaluation quantitative des risques sanitaires ciblant ces pathologies spécifiquement, en veillant à ne pas additionner certains événements de santé pouvant entraîner un double comptage (par exemple, les hospitalisations pour causes cardiovasculaires et les décès toutes causes cardiovasculaires).

## 8.2 VTR long terme pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

Plusieurs fonctions concentration-excès de risque vie entière (ELR) et ERU candidats ont été dérivés pour les effets chroniques néfastes pour la santé humaine présentant des niveaux de causalité élevés (Tableau 12). Parmi ces valeurs, le GT et le CES recommandent pour VTR long terme l'utilisation de l'ERU fondé sur les décès toutes causes non accidentelles présenté dans le Tableau 14. Un niveau de confiance fort a été attribué à cette VTR.

L'ERU pourrait surestimer le risque pour une concentration moyenne annuelle en « carbone suie » entre  $5,0 \cdot 10^{-5}$  et  $12,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  du fait de la forme de la relation entre concentration et risque. Pour affiner le calcul sur cette gamme, l'ERU peut être remplacé par la fonction paramétrique, qui est plus précise. En revanche, pour des concentrations supérieures à  $12,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ , il n'est pas recommandé d'utiliser la fonction paramétrique en raison des fortes incertitudes sur la forme de la relation entre concentration et risque.

Tableau 14. VTR long terme par voie respiratoire pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant

Effet (étude clé)	Fonction Concentration-Excès de risque ou concentration(s) équivalente(s)	VTR long terme (exprimée en absorbance)
Décès toutes causes non accidentelles  (Strak <i>et al.</i> (2021) : analyse <i>poolée</i> de 8 cohortes européennes réalisée dans le cadre du projet ELAPSE, concentrations moyennes annuelles d'absorbance)	Fonction non linéaire d'hazard ratio*	ERU = $5,29 \cdot 10^{-2} (10^{-5} \text{ m}^{-1})^{-1}$
		<p><i>Pour affiner, utiliser la fonction paramétrique ci-dessous :</i></p> <p>ELR = <math>2,86 \cdot 10^{-4} \times [\text{abs}]^3 - 8,24 \cdot 10^{-3} \times [\text{abs}]^2 + 8,00 \cdot 10^{-2} \times [\text{abs}] + 4,49 \cdot 10^{-3}</math></p>
		Niveau de confiance : Fort

[abs] : concentration moyenne annuelle en absorbance ; ELR : excès de risque vie entière (excess lifetime risk), autrement appelé excès de risque individuel (ERI) en évaluation quantitative des risques sanitaires ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ERU : excès de risque unitaire. \* Fonction SCHIF - Shape-Constrained Health Impact Functions, modèle « ensemble ».

La VTR long terme pour le « carbone suie » peut être utilisée en complément de la VTR long terme pour les particules de l'air ambiant ( $PM_{2,5}$  et  $PM_{10}$ ) en présence d'une pollution particulaire issue d'un processus de combustion tel que le trafic routier et le chauffage au bois.

La VTR a été dérivée pour des concentrations moyennes annuelles de « carbone suie » exprimée en absorbance ([abs]), cette dernière étant la métrique sélectionnée pour permettre les comparaisons entre études épidémiologiques (cf. chapitre 5.4.4). Le cas échéant, le GT et le CES rappellent qu'il existe des facteurs de conversion généraux permettant de convertir les concentrations entre les trois métriques suivantes : absorbance, carbone suie et carbone élémentaire (cf. chapitre 2.3.4). Néanmoins, ces facteurs pouvant varier dans le temps et l'espace, il est recommandé d'utiliser, si disponible, un facteur de conversion propre à la méthode de mesure utilisée et à la zone géographique évaluée.

Des ERU et des fonctions paramétriques ont également été élaborées pour d'autres événements de santé en lien avec le « carbone suie » des particules de l'air ambiant (cf. chapitre 7.5). Ces fonctions et ERU peuvent être utilisés au même titre qu'une VTR dans le cadre d'une évaluation quantitative des risques sanitaires ciblant ces pathologies spécifiquement, en veillant à ne pas additionner certains événements de santé entraînant un double comptage (par exemple, les décès toutes causes cardiovasculaires et les décès par cardiopathie ischémique).

Les niveaux de risque acceptables traditionnellement considérés pour les substances chimiques cancérigènes sont de  $10^{-5}$  ou  $10^{-6}$ . Pour les rayonnements ionisants et pour le radon, les niveaux d'exposition acceptables correspondent à un niveau de risque de cancer de l'ordre de  $10^{-3}$  (Anses 2024). A titre indicatif, les niveaux des excès de risque vie entière de décès anticipés correspondant à l'exposition annuelle à une concentration en « carbone suie » de  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  et  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  sont  $6,1 \cdot 10^{-2}$  et  $1,3 \cdot 10^{-1}$  respectivement, en comparaison d'une exposition de référence égale à  $0,55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  (cette dernière étant la limite de la gamme de concentration considérée pour la construction de la VTR).

## 9 Bibliographie

- Achilleos, S., M. A. Kioumourtzoglou, C. D. Wu, J. D. Schwartz, P. Koutrakis et S. I. Papatheodorou. 2017. "Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: A systematic review and meta-regression analysis." *Environ Int* 109: 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.09.010>.
- Afnor. 1993. Norme NF EN 481. Atmosphères des lieux de travail - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. Edité par l'Association française de normalisation (Afnor).
- Afnor. 1996. Norme NF ISO 7708. Qualité de l'air - Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé. Edité par l'Association française de normalisation (Afnor).
- Afsset. 2010. *Évaluation des risques liés aux nanomatériaux pour la population générale et pour l'environnement (saisine n°2008/005)*. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort). <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2008et0005Ra.pdf>.
- AirBreizh. 2020. *Etude du carbone suie à Rennes - Bilan de la première année de mesure (2019)*. AirBreizh. [https://www.airbreizh.asso.fr/voy\\_content/uploads/2020/10/air-breizh-etude-du-carbone-suie-rennes-2019.pdf](https://www.airbreizh.asso.fr/voy_content/uploads/2020/10/air-breizh-etude-du-carbone-suie-rennes-2019.pdf).
- Airparif. 2021. "La surveillance du carbone suie en Ile-de-France." Airparif. Consulté le 27/04/2023. <https://www.airparif.asso.fr/actualite/2021/la-surveillance-du-carbone-suie-en-ile-de-france>.
- Airparif et LSCE. 2011. *Origine des particules en Ile-de-France* Surveillance de la Qualité de l'Air en Ile-de-France ; Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Paris, France). <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/51/070/51070022.pdf>.
- Anses. 2012. *Sélection des polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact des infrastructures routières (saisine n°2010-SA-0283)*. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort, France). <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2010sa0283Ra.pdf>.
- Anses. 2017. *Valeurs toxicologiques de référence - Guide d'élaboration de l'Anses (saisine n°2017-SA-0016)*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort, France). <https://www.anses.fr/fr/system/files/SUBSTANCES2017SA0016Ra.pdf>.
- Anses. 2018. *Polluants "émergents" dans l'air ambiant - Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air (saisine n°2015-SA-0216)*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort, France). <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0216Ra.pdf>.
- Anses. 2019. *Particules de l'air ambiant extérieur - Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie (saisine n°2014-SA-0156)*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Maisons-Alfort, France). <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Sante.pdf>.
- Anses. 2024. *VTR par voie respiratoire pour les particules de l'air ambiant extérieur : recommandation de VTR long terme pour les PM<sub>2,5</sub> et extrapolation aux PM<sub>10</sub> et recommandation de VTR court terme pour les PM<sub>2,5</sub> et les PM<sub>10</sub> (saisine n°2019-SA-0198)*. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) (Maisons-Alfort, France).

- Atkinson, R. W., I. C. Mills, H. A. Walton et H. R. Anderson. 2015. "Fine particle components and health—a systematic review and meta-analysis of epidemiological time series studies of daily mortality and hospital admissions." *J Expo Sci Environ Epidemiol* 25 (2): 208-14. <https://doi.org/10.1038/jes.2014.63>.
- Babich, P., M. Davey, G. Allen et P. Koutrakis. 2000. "Method comparisons for particulate nitrate, elemental carbon, and PM<sub>2.5</sub> mass in seven U.S. cities." *J Air Waste Manag Assoc* 50 (7): 1095-1105. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464152>.
- Basagaña, X., B. Jacquemin, A. Karanasiou, B. Ostro, X. Querol, D. Agis, E. Alessandrini, J. Alguacil, B. Artiñano, M. Catrambone, J. D. de la Rosa, J. Díaz, A. Faustini, S. Ferrari, F. Forastiere, K. Katsouyanni, C. Linares, C. Perrino, A. Ranzi, I. Ricciardelli, E. Samoli, S. Zauli-Sajani, J. Sunyer et M. Stafoggia. 2015. "Short-term effects of particulate matter constituents on daily hospitalizations and mortality in five South-European cities: results from the MED-PARTICLES project." *Environ Int* 75: 151-8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.011>.
- Bessagnet, B., A. Hodzic, R. Vautard, M. Beekmann, S. Cheinet, C. Honoré, C. Liousse et L. Rouil. 2004. "Aerosol modeling with CHIMERE—preliminary evaluation at the continental scale." *Atmospheric Environment* 38 (18): 2803-2817. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.034>.
- Bessagnet, B., L. Menut, G. Curci, A. Hodzic, B. Guillaume, C. Liousse, S. Moukhtar, B. Pun, C. Seigneur et M. Schulz. 2009. "Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe—focus on secondary organic aerosols." *Journal of Atmospheric Chemistry* 61 (3): 175-202. <https://doi.org/10.1007/s10874-009-9129-2>.
- Bi, J., R. R. D'Souza, S. Moss, N. Senthikumar, A. G. Russell, N. C. Scovronick, H. H. Chang et S. Ebel. 2023. "Acute Effects of Ambient Air Pollution on Asthma Emergency Department Visits in Ten U.S. States." *Environ Health Perspect* 131 (4): 47003. <https://doi.org/10.1289/ehp11661>.
- Boogaard, H., A. P. Patton, R. W. Atkinson, J. R. Brook, H. H. Chang, D. L. Crouse, J. C. Fussell, G. Hoek, B. Hoffmann, R. Kappeler, M. Kutlar Joss, M. Ondras, S. K. Sagiv, E. Samoli, R. Shaikh, A. Smargiassi, A. A. Szpiro, E. D. S. Van Vliet, D. Vienneau, J. Weuve, F. W. Lurmann et F. Forastiere. 2022. "Long-term exposure to traffic-related air pollution and selected health outcomes: A systematic review and meta-analysis." *Environ Int* 164: 107262. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107262>.
- Bowatte, G., C. Lodge, A. J. Lowe, B. Erbas, J. Perret, M. J. Abramson, M. Matheson et S. C. Dharmage. 2015. "The influence of childhood traffic-related air pollution exposure on asthma, allergy and sensitization: a systematic review and a meta-analysis of birth cohort studies." *Allergy* 70 (3): 245-56. <https://doi.org/10.1111/all.12561>.
- Brauer, M., C. Lencar, L. Tamburic, M. Koehoorn, P. Demers et C. Karr. 2008. "A cohort study of traffic-related air pollution impacts on birth outcomes." *Environ Health Perspect* 116 (5): 680-6. <https://doi.org/10.1289/ehp.10952>.
- Brooke, B. S., T. A. Schwartz et T. M. Pawlik. 2021. "MOOSE Reporting Guidelines for Meta-analyses of Observational Studies." *JAMA Surgery* 156 (8): 787-788. <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2021.0522>.
- Brown, R. J. C., S. Beccaceci, D. M. Butterfield, P. G. Quincey, P. M. Harris, T. Maggos, P. Panteliadis, A. John, A. Jedynska, T. A. J. Kuhlbusch, J.-P. Putaud et A. Karanasiou. 2017. "Standardisation of a European measurement method for organic carbon and elemental carbon in ambient air: results of the field trial campaign and the determination of a measurement uncertainty and working range." *Environ Sci: Processes Impacts* 19 (10): 1249-1259. <https://doi.org/10.1039/C7EM00261K>.
- Brunekreef, B., M. Strak, J. Chen, Z. J. Andersen, R. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bellander, M.-C. Boutron, J. Brandt, I. Carey, G. Cesaroni, F. Forastiere, D. Fehcht, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, K. de Hoogh, D. Houthuijs, U. Hvidtfeldt, N. Janssen, J. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, J. Klompmaker, N. Hjertager Krog, S. Liu, P.

- Ljungman, A. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, S. Rodopoulou, E. Samoli, P. Schwarze, T. Sigsgaard, M. Stafoggia, D. Vienneau, G. Weinmayr, K. Wolf et G. Hoek. 2021. *Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM<sub>2.5</sub>, BC, NO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub>: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project*. Research Report 208. Health Effects Institute (HEI) (Boston, MA). <https://www.healtheffects.org/publication/mortality-and-morbidity-effects-long-term-exposure-low-level-pm25-bc-no2-and-o3-analysis>.
- Cesaroni, G., F. Forastiere, M. Stafoggia, Z. J. Andersen, C. Badaloni, R. Beelen, B. Caracciolo, U. de Faire, R. Erbel, K. T. Eriksen, L. Fratiglioni, C. Galassi, R. Hampel, M. Heier, F. Hennig, A. Hilding, B. Hoffmann, D. Houthuijs, K. H. Jöckel, M. Korek, T. Lanki, K. Leander, P. K. Magnusson, E. Migliore, C. G. Ostenson, K. Overvad, N. L. Pedersen, J. P. J. J. Penell, G. Pershagen, A. Pyko, O. Raaschou-Nielsen, A. Ranzi, F. Ricceri, C. Sacerdote, V. Salomaa, W. Swart, A. W. Turunen, P. Vineis, G. Weinmayr, K. Wolf, K. de Hoogh, G. Hoek, B. Brunekreef et A. Peters. 2014. "Long term exposure to ambient air pollution and incidence of acute coronary events: prospective cohort study and meta-analysis in 11 European cohorts from the ESCAPE Project." *Bmj* 348: f7412. <https://doi.org/10.1136/bmj.f7412>.
- Chen, J., K. de Hoogh, J. Gulliver, B. Hoffmann, O. Hertel, M. Ketznel, G. Weinmayr, M. Bauwelinck, A. van Donkelaar, U. A. Hvidtfeldt, R. Atkinson, N. A. H. Janssen, R. V. Martin, E. Samoli, Z. J. Andersen, B. M. Oftedal, M. Stafoggia, T. Bellander, M. Strak, K. Wolf, D. Vienneau, B. Brunekreef et G. Hoek. 2020. "Development of Europe-Wide Models for Particle Elemental Composition Using Supervised Linear Regression and Random Forest." *Environ Sci Technol* 54 (24): 15698-15709. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06595>.
- Citepa. 2022. *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten. Bilan des émissions en France de 1990 à 2021*. [https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa\\_Rapport-Secten-2022\\_Rapport-complet\\_v1.8.pdf](https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Rapport-Secten-2022_Rapport-complet_v1.8.pdf).
- de Hoogh, K., J. Chen, J. Gulliver, B. Hoffmann, O. Hertel, M. Ketznel, M. Bauwelinck, A. van Donkelaar, U. A. Hvidtfeldt, K. Katsouyanni, J. Klompmaker, R. V. Martin, E. Samoli, P. E. Schwartz, M. Stafoggia, T. Bellander, M. Strak, K. Wolf, D. Vienneau, B. Brunekreef et G. Hoek. 2018a. "Spatial PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and BC models for Western Europe – Evaluation of spatiotemporal stability." *Environ Int* 120: 81-92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.036>.
- de Hoogh, K., J. Chen, J. Gulliver, B. Hoffmann, O. Hertel, M. Ketznel, M. Bauwelinck, A. van Donkelaar, U. A. Hvidtfeldt, K. Katsouyanni, J. Klompmaker, R. V. Martin, E. Samoli, P. E. Schwartz, M. Stafoggia, T. Bellander, M. Strak, K. Wolf, D. Vienneau, B. Brunekreef et G. Hoek. 2018b. "Spatial PM(2.5), NO(2), O(3) and BC models for Western Europe - Evaluation of spatiotemporal stability." *Environ Int* 120: 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.036>.
- Defossez, G., S. Le Guyader-Peyrou, Z. Uhry, P. Grosclaude, M. Colonna et E. Dantony. 2019. *Synthèse - Estimations nationales de l'incidence et de la mortalité par cancer en France métropolitaine entre 1990 et 2018*. <https://www.e-cancer.fr/Expertises-et-publications/Catalogue-des-publications/Synthese-Estimations-nationales-de-l-incidence-et-de-la-mortalite-par-cancer-en-France-metropolitaine-entre-1990-et-20182>.
- DREES et Santé Publique France. 2017. *L'état de santé de la population en France - Rapport 2017*. Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques (DREES) et Santé Publique France. <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2021-01/Rapport-ESPF-2017.pdf>.

- EEA. 2013. *Status of black carbon monitoring in ambient air in Europe - Rechnical report No 18/2013*. European Environment Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-black-carbon-monitoring>.
- Favez, O., J.-L. Jaffrezo, D. Salameh et T. Amodeo. 2017. *Etat des lieux sur les connaissances apportées par les études expérimentales des sources de particules fines en France - Projet SOURCES*. ADEME en partenariat avec INERIS et IGE. <https://bibliothèque.ademe.fr/air-et-bruit/1402-etat-des-lieux-sur-les-connaissances-apportees-par-les-etudes-experimentales-des-sources-de-particules-fines-en-france.html>.
- Fuks, K. B., G. Weinmayr, X. Basagaña, O. Gruzieva, R. Hampel, B. Oftedal, M. Sørensen, K. Wolf, G. Aamodt, G. M. Aasvang, I. Aguilera, T. Becker, R. Beelen, B. Brunekreef, B. Caracciolo, J. Cyrus, R. Elosua, K. T. Eriksen, M. Foraster, L. Fratiglioni, A. Hilding, D. Houthuijs, M. Korek, N. Künzli, J. Marrugat, M. Nieuwenhuijsen, C. G. Östenson, J. Penell, G. Pershagen, O. Raaschou-Nielsen, W. J. R. Swart, A. Peters et B. Hoffmann. 2017. "Long-term exposure to ambient air pollution and traffic noise and incident hypertension in seven cohorts of the European study of cohorts for air pollution effects (ESCAPE)." *Eur Heart J* 38 (13): 983-990. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehw413>.
- Gauthier, V., D. Cottel, P. Amouyel, J. Dallongeville et A. Meirhaeghe. 2020. "Létalité à 28 jours après un accident vasculaire cérébral selon l'étiologie et le sexe, registre des AVC de Lille, 2008-2017." *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire* 17 (1): 336-343.
- Gehring, U., L. Tamburic, H. Sbihi, H. W. Davies et M. Brauer. 2014. "Impact of noise and air pollution on pregnancy outcomes." *Epidemiology* 25 (3): 351-8. <https://doi.org/10.1097/ede.0000000000000073>.
- Gehring, U., A. H. Wijga, G. Hoek, T. Bellander, D. Berdel, I. Brüske, E. Fuertes, O. Gruzieva, J. Heinrich, B. Hoffmann, J. C. de Jongste, C. Klümper, G. H. Koppelman, M. Korek, U. Krämer, D. Maier, E. Melén, G. Pershagen, D. S. Postma, M. Standl, A. von Berg, J. M. Anto, J. Bousquet, T. Keil, H. A. Smit et B. Brunekreef. 2015. "Exposure to air pollution and development of asthma and rhinoconjunctivitis throughout childhood and adolescence: a population-based birth cohort study." *Lancet Respir Med* 3 (12): 933-42. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(15\)00426-9](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(15)00426-9).
- Goldbohm, R. A., E. L. Tielemans, D. Heederik, C. M. Rubingh, S. Dekkers, M. I. Willems et E. Dinant Kroese. 2006. "Risk estimation for carcinogens based on epidemiological data: a structured approach, illustrated by an example on chromium." *Regul Toxicol Pharmacol* 44 (3): 294-310. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2006.01.007>.
- HEI. 2020. *State of Global Air 2020. A special report on global exposure to air pollution and its health impacts*. Health Effects Institute (HEI) (Boston, MA). <https://www.stateofglobalair.org/>.
- HEI. 2022. *Panel on the Health Effects of Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution - Systematic Review and Meta-analysis of Selected Health Effects of Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution. Special Report 23*. Health Effects Institute (Boston, MA).
- Hoek, G., R. M. Krishnan, R. Beelen, A. Peters, B. Ostro, B. Brunekreef et J. D. Kaufman. 2013. "Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review." *Environ Health* 12 (1): 43. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-12-43>.
- Hvidtfeldt, U. A., M. Sørensen, C. Geels, M. Ketzel, J. Khan, A. Tjønneland, K. Overvad, J. Brandt et O. Raaschou-Nielsen. 2019. "Long-term residential exposure to PM(2.5), PM(10), black carbon, NO(2), and ozone and mortality in a Danish cohort." *Environ Int* 123: 265-272. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.010>.
- INSERM-CépiDC. 2019. Effectifs de décès et taux bruts de mortalité, selon le sexe, tout sexe, domiciliés en France entière (sans Mayotte et COM) pour les années 2011 à 2015 regroupées, pour les causes suivantes : toutes causes (code CIM10 A00-Y89), toutes causes (code CIM10 A00-Y89) – causes de mort « violente » (codes CIM10 V01-V99

- à V01-Y89ncpreced), maladies de l'appareil circulatoire (code CIM10 I00-I99), maladies de l'appareil respiratoire (code CIM10 J00-J99), tumeurs malignes des bronches et du poumon (code CIM10 C34). Communication personnelle du 20 juin 2019.
- INSERM-CépiDC. 2020. Effectifs de décès et taux bruts de mortalité, selon le sexe, tout sexe, domiciliés en France entière (sans Mayotte et COM) pour les années 2011 à 2015 regroupées, pour les causes suivantes : infection des voies respiratoires inférieures (pneumonie) (CIM 10 J12-J18), infection des voies respiratoires inférieures (pneumonie) incluant gripes (CIM 10 J10-J19), maladies cérébrovasculaires (CIM 10 I60-I69), broncho-pneumopathie chronique obstructive (CIM 10 J19-J46) et cardiopathie ischémique (CIM 10 I20-I25). Communication personnelle du 17 avril 2020.
- Ishinishi, N., N. Kuwabara, Y. Takaki, S. Nagase, T. Suzuki, T. Nakajima, K. Maejima, A. Kato et M. Nakamura. 1988. *Long-term inhalation experiments on diesel exhaust. In: Diesel exhaust and health risks: Results of the HERP studies*. Ibaraki, Japan: Japan Automobile Research Institute, Inc., Research Committee for HERP Studies.
- Jacquemin, B., V. Siroux, M. Sanchez, A. E. Carsin, T. Schikowski, M. Adam, V. Bellisario, A. Buschka, R. Bono, B. Brunekreef, Y. Cai, M. Cirach, F. Clavel-Chapelon, C. Declercq, R. de Marco, A. de Nazelle, R. E. Ducret-Stich, V. V. Ferretti, M. W. Gerbase, R. Hardy, J. Heinrich, C. Janson, D. Jarvis, Z. Al Kanaani, D. Keidel, D. Kuh, N. Le Moual, M. J. Nieuwenhuijsen, A. Marcon, L. Modig, I. Pin, T. Rochat, C. Schindler, D. Sugiri, M. Stempfelet, S. Temam, M. Y. Tsai, R. Varraso, D. Vienneau, A. Vierkötter, A. L. Hansell, U. Krämer, N. M. Probst-Hensch, J. Sunyer, N. Künzli et F. Kauffmann. 2015. "Ambient air pollution and adult asthma incidence in six European cohorts (ESCAPE)." *Environ Health Perspect* 123 (6): 613-21. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408206>.
- Janssen, N. A. H., M. E. Gerlofs-Nijland, T. Lanki, R. O. Salonen, F. Cassee, G. Hoek, P. Fischer, B. Brunekreef et M. Krzyzanowski. 2012. *Health effects of black carbon*. Copenhagen: World Health Organization. Regional Office for Europe.
- Janssen, N. A. H., G. Hoek, M. Simic-Lawson, P. Fischer, L. van Bree, H. ten Brink, M. Keuken, R. W. Atkinson, H. R. Anderson, B. Brunekreef et F. R. Cassee. 2011. "Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM10 and PM2.5." *Environ Health Perspect* 119 (12): 1691-1699. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>.
- Khreis, H., C. Kelly, J. Tate, R. Parslow, K. Lucas et M. Nieuwenhuijsen. 2017. "Exposure to traffic-related air pollution and risk of development of childhood asthma: A systematic review and meta-analysis." *Environ Int* 100: 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.012>.
- Kingsley, S. L., M. N. Eliot, K. Glazer, Y. A. Awad, J. D. Schwartz, D. A. Savitz, K. T. Kelsey, C. J. Marsit et G. A. Wellenius. 2017. "Maternal ambient air pollution, preterm birth and markers of fetal growth in Rhode Island: results of a hospital-based linkage study." *J Epidemiol Community Health* 71 (12): 1131-1136. <https://doi.org/10.1136/jech-2017-208963>.
- Korte, J. E., I. Hertz-Picciotto, M. R. Schulz, L. M. Ball et E. J. Duell. 2000. "The contribution of benzene to smoking-induced leukemia." *Environmental Health Perspectives* 108 (4): 333-339. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108333>.
- LCSQA. 2012. *Note du LCSQA - Métrologie des particules : carbone élémentaire ou black carbon ?* Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2012/ineris/carbone-elementaire-ou-black-carbon>.
- LCSQA. 2019. *Note technique - Mesure des particules ultrafines au sein du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air* Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'air (LCSQA). <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/mesure-des-particules-ultrafines-au-sein-du-dispositif-national-de-surveillance-de-la>.

- LCSQA. 2020a. *Guide méthodologique pour la mesure du « Black Carbon » par Aethalomètre multi longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant*. Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. [https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2019-Guide\\_mesure\\_BlackCarbon\\_par\\_AE33\\_VF03-Approuv%C3%A9CPS15122020.pdf](https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA2019-Guide_mesure_BlackCarbon_par_AE33_VF03-Approuv%C3%A9CPS15122020.pdf).
- LCSQA. 2020b. *Liste des appareils conformes pour la mesure réglementaire de la qualité de l'air*. Laboratoire Central de la Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). [https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/Liste%20appareils%20conforme%20mesure%20qualit%C3%A9%20air%20M%C3%A0J\\_13-05-20\\_v2\\_0.pdf](https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/Liste%20appareils%20conforme%20mesure%20qualit%C3%A9%20air%20M%C3%A0J_13-05-20_v2_0.pdf).
- Lequy, E., J. Siemiatycki, K. de Hoogh, D. Vienneau, J.-F. Dupuy, V. Garès, O. Hertel, J. H. Christensen, S. Zhivin, M. Goldberg, M. Zins et B. Jacquemin. 2021. "Contribution of Long-Term Exposure to Outdoor Black Carbon to the Carcinogenicity of Air Pollution: Evidence regarding Risk of Cancer in the Gazel Cohort." *Environ Health Perspect* 129 (3): 037005. <https://doi.org/10.1289/EHP8719>.
- Levy, J. I., D. Diez, Y. Dou, C. D. Barr et F. Dominici. 2012. "A meta-analysis and multisite time-series analysis of the differential toxicity of major fine particulate matter constituents." *Am J Epidemiol* 175 (11): 1091-9. <https://doi.org/10.1093/aje/kwr457>.
- Liu, S., J. T. Jørgensen, P. Ljungman, G. Pershagen, T. Bellander, K. Leander, P. K. E. Magnusson, D. Rizzuto, U. A. Hvidtfeldt, O. Raaschou-Nielsen, K. Wolf, B. Hoffmann, B. Brunekreef, M. Strak, J. Chen, A. Mehta, R. W. Atkinson, M. Bauwelinck, R. Varraso, M. C. Boutron-Ruault, J. Brandt, G. Cesaroni, F. Forastiere, D. Fecht, J. Gulliver, O. Hertel, K. de Hoogh, N. A. H. Janssen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, J. O. Klompmaker, G. Nagel, B. Oftedal, A. Peters, A. Tjønneland, S. P. Rodopoulou, E. Samoli, T. Bekkevold, T. Sigsgaard, M. Stafoggia, D. Vienneau, G. Weinmayr, G. Hoek et Z. J. Andersen. 2021b. "Long-term exposure to low-level air pollution and incidence of chronic obstructive pulmonary disease: The ELAPSE project." *Environ Int* 146: 106267. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106267>.
- Liu, S., J. T. Jørgensen, P. Ljungman, G. Pershagen, T. Bellander, K. Leander, P. K. E. Magnusson, D. Rizzuto, U. A. Hvidtfeldt, O. Raaschou-Nielsen, K. Wolf, B. Hoffmann, B. Brunekreef, M. Strak, J. Chen, A. Mehta, R. W. Atkinson, M. Bauwelinck, R. Varraso, M. C. Boutron-Ruault, J. Brandt, G. Cesaroni, F. Forastiere, D. Fecht, J. Gulliver, O. Hertel, K. de Hoogh, N. A. H. Janssen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, J. O. Klompmaker, G. Nagel, B. Oftedal, A. Peters, A. Tjønneland, S. P. Rodopoulou, E. Samoli, D. T. Kristoffersen, T. Sigsgaard, M. Stafoggia, D. Vienneau, G. Weinmayr, G. Hoek et Z. J. Andersen. 2021a. "Long-term exposure to low-level air pollution and incidence of asthma: the ELAPSE project." *Eur Respir J* 57 (6). <https://doi.org/10.1183/13993003.03099-2020>.
- Ljungman, P. L. S., N. Andersson, L. Stockfelt, E. M. Andersson, J. Nilsson Sommar, K. Eneroth, L. Gidhagen, C. Johansson, A. Lager, K. Leander, P. Molnar, N. L. Pedersen, D. Rizzuto, A. Rosengren, D. Segersson, P. Wennberg, L. Barregard, B. Forsberg, G. Sallsten, T. Bellander et G. Pershagen. 2019. "Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution, Black Carbon, and Their Source Components in Relation to Ischemic Heart Disease and Stroke." *Environ Health Perspect* 127 (10): 107012. <https://doi.org/10.1289/ehp4757>.
- Luben, T. J., J. L. Nichols, S. J. Dutton, E. Kirrane, E. O. Owens, L. Datko-Williams, M. Madden et J. D. Sacks. 2017. "A systematic review of cardiovascular emergency department visits, hospital admissions and mortality associated with ambient black carbon." *Environment International* 107: 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.005>.
- MacIntyre, E. A., U. Fau Gehring, A. Mölter, E. Fuertes, C. Klümper, U. Krämer, U. Quass, B. Hoffmann, M. Gascon, B. Brunekreef, G. H. Koppelman, R. Beelen, G. Hoek, M. Birk, J. C. de Jongste, H. Smih, J. Cyrus, O. Gruzjeva, M. Korek, A. Bergström, R. M. Agius, F. de Vocht, A. Simpson, D. Porta, F. Forastiere, C. Badaloni, G. Cesaroni, A. Esplugues, A. Fernández-Somoano, A. Loxton, J. Sunyer, M. Cirach, M. Nieuwenhuijsen, G. Pershagen et J. Heinrich. 2014. "Air pollution and respiratory

- infections during early childhood: an analysis of 10 European birth cohorts within the ESCAPE Project." *Environ Health Perspect* 122 (1): 107-13. <https://doi.org/10.1289/ehp.1306755>.
- Nasari, M. M., M. Szyszkowicz, H. Chen, D. Crouse, M. C. Turner, M. Jerrett, C. A. Pope, 3rd, B. Hubbell, N. Fann, A. Cohen, S. M. Gapstur, W. R. Diver, D. Stieb, M. H. Forouzanfar, S. Y. Kim, C. Olives, D. Krewski et R. T. Burnett. 2016. "A class of non-linear exposure-response models suitable for health impact assessment applicable to large cohort studies of ambient air pollution." *Air Qual Atmos Health* 9 (8): 961-972. <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0398-z>.
- Nilsson Sommar, J., E. M. Andersson, N. Andersson, G. Sallsten, L. Stockfelt, P. L. Ljungman, D. Segersson, K. Eneroth, L. Gidhagen, P. Molnar, P. Wennberg, A. Rosengren, D. Rizzuto, K. Leander, A. Lager, P. K. Magnusson, C. Johansson, L. Barregard, T. Bellander, G. Pershagen et B. Forsberg. 2021. "Long-term exposure to particulate air pollution and black carbon in relation to natural and cause-specific mortality: a multicohort study in Sweden." *BMJ Open* 11 (9): e046040. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046040>.
- NRC. 1988. *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: BEIR IV*. <https://doi.org/10.17226/1026>. Washington, DC: The National Academies Press, National Research Council (NRC).
- NRC. 2009. *Science and Decisions: Advancing Risk Assessment*. The National Academies Press, National Research Council (Washington, DC). <https://doi.org/10.17226/12209>.
- NTP OHAT. 2015. *Handbook for Conducting a Literature-Based Health Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence Integration*. Office of Health Assessment and Translation (OHAT), Division of the National Toxicology Program (NTP). [https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/ohat/pubs/handbookjan2015\\_508.pdf](https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/ohat/pubs/handbookjan2015_508.pdf).
- Olstrup, H., C. Johansson et B. Forsberg. 2016. "The Use of Carbonaceous Particle Exposure Metrics in Health Impact Calculations." *Int J Environ Res Public Health* 13 (3). <https://doi.org/10.3390/ijerph13030249>.
- OMS. 2001. *Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution - Report of a WHO working group - Bilthoven, Netherlands 20-22 November 2000*. Organisation Mondiale de la Santé, bureau régional Europe (Copenhagen). <https://apps.who.int/iris/handle/10665/108463>.
- OMS. 2013. *Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project - technical report*. Organisation Mondiale de la Santé, bureau régional Europe. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/341712>.
- OMS. 2020a. *Health impact assessment of air pollution: introductory manual to AirQ+*. Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Bureau régional Europe. <https://iris.who.int/handle/10665/337681>.
- OMS. 2020b. *Risk of bias (RoB) assessment instrument for systematic reviews informing WHO Global Air Quality Guidelines (WHO/EURO:2020-5556-45321-64864)*. World Health Organisation (WHO) Regional Office for Europe (Copenhagen, Denmark). <https://www.who.int/europe/publications/i/item/WHO-EURO-2020-5556-45321-64864>.
- OMS. 2021. *WHO global air quality guidelines - Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Organisation Mondiale de la Santé (Geneva, Switzerland). <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- Orellano, P., J. Reynoso, N. Quaranta, A. Bardach et A. Ciapponi. 2020. "Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis." *Environ Int* 142: 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>.
- Pedersen, M., L. Giorgis-Allemand, C. Bernard, I. Aguilera, A. M. Andersen, F. Ballester, R. M. Beelen, L. Chatzi, M. Cirach, A. Danileviciute, A. Dedele, Mv Eijsden, M. Estarlich,

- A. Fernández-Somoano, M. F. Fernández, F. Forastiere, U. Gehring, R. Grazuleviciene, O. Gruzieva, B. Heude, G. Hoek, K. de Hoogh, E. H. van den Hooven, S. E. Håberg, V. W. Jaddoe, C. Klümper, M. Korek, U. Krämer, A. Lerchundi, J. Lepeule, P. Nafstad, W. Nystad, E. Patelarou, D. Porta, D. Postma, O. Raaschou-Nielsen, P. Rudnai, J. Sunyer, E. Stephanou, M. Sørensen, E. Thiering, D. Tuffnell, M. J. Varró, T. G. Vrijkotte, A. Wijga, M. Wilhelm, J. Wright, M. J. Nieuwenhuijsen, G. Pershagen, B. Brunekreef, M. Kogevinas et R. Slama. 2013. "Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study (ESCAPE)." *Lancet Respir Med* 1 (9): 695-704. [https://doi.org/10.1016/s2213-2600\(13\)70192-9](https://doi.org/10.1016/s2213-2600(13)70192-9).
- Petzold, A., J.A. Ogren, M. Fiebig, P. Laj, S.-M. Li, U. Baltensperger, T. Holzer-Popp, S. Kinne, G. Pappalardo, N. Sugimoto, C. Wehrl, A. Wiedensohler et X.-Y. Zhang. 2013. "Recommendations for reporting "black carbon" measurements." *Atmos Chem Phys* 13: 8365-8379.
- Roorda-Knape, M. C., N. A. H. Janssen, J. J. De Hartog, P. H. N. Van Vliet, H. Harssema et B. Brunekreef. 1998. "Air pollution from traffic in city districts near major motorways." *Atmos Environ* 32 (11): 1921-1930. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00496-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00496-2).
- Santé Publique France. 2019. *Pollution atmosphérique. Guide pour la réalisation d'une évaluation quantitative des impacts sur la santé (EQIS). EQIS avec une exposition mesurée*. Santé Publique France. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/air/documents/guide/pollution-atmospherique.-guide-pour-la-realisation-d-une-evaluation-quantitative-des-impacts-sur-la-sante-eqis-.eqis-avec-une-exposition-mesuree>.
- Schwartz, J., F. Laden et A. Zanobetti. 2002. "The concentration-response relation between PM(2.5) and daily deaths." *Environ Health Perspect* 110 (10): 1025-1029. <https://doi.org/10.1289/ehp.021101025>.
- SDES. 2021. *Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2020*. Service des données et études statistiques (Paris, France). [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-10/datalab\\_95\\_bilan\\_qualite\\_air\\_exterieur\\_france\\_octobre2021.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-10/datalab_95_bilan_qualite_air_exterieur_france_octobre2021.pdf).
- Song, X., Y. Hu, Y. Ma, L. Jiang, X. Wang, A. Shi, J. Zhao, Y. Liu, Y. Liu, J. Tang, X. Li, X. Zhang, Y. Guo et S. Wang. 2022. "Is short-term and long-term exposure to black carbon associated with cardiovascular and respiratory diseases? A systematic review and meta-analysis based on evidence reliability." *BMJ Open* 12 (5): e049516. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-049516>.
- Stafoggia, M., B. Oftedal, J. Chen, S. Rodopoulou, M. Renzi, R. W. Atkinson, M. Bauwelinck, J. O. Klompmaker, A. Mehta, D. Vienneau, Z. J. Andersen, T. Bellander, J. Brandt, G. Cesaroni, K. de Hoogh, D. Fehcht, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, U. A. Hvidtfeldt, K. H. Jöckel, J. T. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, D. T. Kristoffersen, A. Lager, K. Leander, S. Liu, P. L. S. Ljungman, G. Nagel, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, D. Rizzuto, S. Schramm, P. E. Schwarze, G. Severi, T. Sigsgaard, M. Strak, Y. T. van der Schouw, M. Verschuren, G. Weinmayr, K. Wolf, E. Zitt, E. Samoli, F. Forastiere, B. Brunekreef, G. Hoek et N. A. H. Janssen. 2022. "Long-term exposure to low ambient air pollution concentrations and mortality among 28 million people: results from seven large European cohorts within the ELAPSE project." *Lancet Planet Health* 6 (1): e9-e18. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00277-1](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00277-1).
- Strak, M., G. Weinmayr, S. Rodopoulou, J. Chen, K. de Hoogh, Z. J. Andersen, R. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bekkevold, T. Bellander, M. C. Boutron-Ruault, J. Brandt, G. Cesaroni, H. Concin, D. Fehcht, F. Forastiere, J. Gulliver, O. Hertel, B. Hoffmann, U. A. Hvidtfeldt, N. A. H. Janssen, K. H. Jöckel, J. T. Jørgensen, M. Ketzel, J. O. Klompmaker, A. Lager, K. Leander, S. Liu, P. Ljungman, P. K. E. Magnusson, A. J. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, G. Pershagen, A. Peters, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, D. Rizzuto, Y. T. van der Schouw, S. Schramm, G. Severi, T. Sigsgaard, M. Sørensen,

- M. Stafoggia, A. Tjønneland, W. M. M. Verschuren, D. Vienneau, K. Wolf, K. Katsouyanni, B. Brunekreef, G. Hoek et E. Samoli. 2021. "Long term exposure to low level air pollution and mortality in eight European cohorts within the ELAPSE project: pooled analysis." *Bmj* 374: n1904. <https://doi.org/10.1136/bmj.n1904>.
- Sun, X., X. Luo, C. Zhao, B. Zhang, J. Tao, Z. Yang, W. Ma et T. Liu. 2016. "The associations between birth weight and exposure to fine particulate matter (PM2.5) and its chemical constituents during pregnancy: A meta-analysis." *Environ Pollut* 211: 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.022>.
- Trechera, P., M. Garcia-Marlès, X. Liu, C. Reche, N. Pérez, M. Savadkoohi, D. Beddows, I. Salma, M. Vörösmarty, A. Casans, J. A. Casquero-Vera, C. Hueglin, N. Marchand, B. Chazeau, G. Gille, P. Kalkavouras, N. Mihalopoulos, J. Ondracek, N. Zikova, J. V. Niemi, H. E. Manninen, D. C. Green, A. H. Tremper, M. Norman, S. Vratolis, K. Eleftheriadis, F. J. Gómez-Moreno, E. Alonso-Blanco, H. Gerwig, A. Wiedensohler, K. Weinhold, M. Merkel, S. Bastian, J. E. Petit, O. Favez, S. Crumeyrolle, N. Ferlay, S. Martins Dos Santos, J. P. Putaud, H. Timonen, J. Lampilahti, C. Asbach, C. Wolf, H. Kaminski, H. Altug, B. Hoffmann, D. Q. Rich, M. Pandolfi, R. M. Harrison, P. K. Hopke, T. Petäjä, A. Alastuey et X. Querol. 2023. "Phenomenology of ultrafine particle concentrations and size distribution across urban Europe." *Environ Int* 172: 107744. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107744>.
- Tsoli, S., G. B. Ploubidis et O.-I. Kalantzi. 2019. "Particulate air pollution and birth weight: A systematic literature review." *Atmospheric Pollution Research* 10 (4): 1084-1122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.016>.
- US EPA. 2002. *Health Assessment of 1,3-Butadiene*. National Center for Environmental Assessment - Washington Office - Office of Research and Development - U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (Washington, DC). [https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris\\_documents/documents/supdocs/butasup.pdf](https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/supdocs/butasup.pdf).
- US EPA. 2003. "Integrated Risk Information System (IRIS) for diesel engine exhaust." U.S. Environmental Protection Agency. Dernière mise à jour 28 FEVRIER 2003. Consulté le 27 AVRIL 2023. [https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance\\_nmbr=642](https://iris.epa.gov/ChemicalLanding/&substance_nmbr=642).
- US EPA. 2012. *Report to Congress on black carbon*. U.S. Environmental Protection Agency (Washington, DC).
- US EPA. 2019. *Integrative science assessment for particulate matter*. U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC). <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-particulate-matter#overview>.
- US EPA. 2021. "Reviewing National Ambient Air Quality Standards (NAAQS): Scientific and Technical Information." United States Environmental Protection Agency (US EPA). <https://www.epa.gov/naaqs>.
- Watson, J. G. et J. C. Chow. 2002. "Comparison and evaluation of in situ and filter carbon measurements at the Fresno Supersite." *J Geophys Res* 107 (D21): 8341. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2001JD000573>.
- Wolf, K., B. Hoffmann, Z. J. Andersen, R. W. Atkinson, M. Bauwelinck, T. Bellander, J. Brandt, B. Brunekreef, G. Cesaroni, J. Chen, U. de Faire, K. de Hoogh, D. Fecht, F. Forastiere, J. Gulliver, O. Hertel, U. A. Hvidtfeldt, N. A. H. Janssen, J. T. Jørgensen, K. Katsouyanni, M. Ketzel, J. O. Klompmaker, A. Lager, S. Liu, C. J. MacDonald, P. K. E. Magnusson, A. J. Mehta, G. Nagel, B. Oftedal, N. L. Pedersen, G. Pershagen, O. Raaschou-Nielsen, M. Renzi, D. Rizzuto, S. Rodopoulou, E. Samoli, Y. T. van der Schouw, S. Schramm, P. Schwarze, T. Sigsgaard, M. Sørensen, M. Stafoggia, M. Strak, A. Tjønneland, W. M. M. Verschuren, D. Vienneau, G. Weinmayr, G. Hoek, A. Peters et P. L. S. Ljungman. 2021. "Long-term exposure to low-level ambient air pollution and incidence of stroke and coronary heart disease: a pooled analysis of six European cohorts within the ELAPSE project." *Lancet Planet Health* 5 (9): e620-e632. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00195-9](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00195-9).

- Yang, J., M. J. Z. Sakhvidi, K. de Hoogh, D. Vienneau, J. Siemiatyck, M. Zins, M. Goldberg, J. Chen, E. Lequy et B. Jacquemin. 2021. "Long-term exposure to black carbon and mortality: A 28-year follow-up of the GAZEL cohort." *Environ Int* 157: 106805. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106805>.
- Yang, Y., Z. Ruan, X. Wang, Y. Yang, T. G. Mason, H. Lin et L. Tian. 2019. "Short-term and long-term exposures to fine particulate matter constituents and health: A systematic review and meta-analysis." *Environmental Pollution* 247: 874-882. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.12.060>.
- Zare Sakhvidi, M. J., J. Yang, E. Lequy, J. Chen, K. de Hoogh, N. Letellier, M. Mortamais, A. Ozguler, D. Vienneau, M. Zins, M. Goldberg, C. Berr et B. Jacquemin. 2022. "Outdoor air pollution exposure and cognitive performance: findings from the enrolment phase of the CONSTANCES cohort." *Lancet Planet Health* 6 (3): e219-e229. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00001-8](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00001-8).
- Zhang, J. et K. F. Yu. 1998. "What's the Relative Risk? A Method of Correcting the Odds Ratio in Cohort Studies of Common Outcomes." *JAMA* 280 (19): 1690-1691. <https://doi.org/10.1001/jama.280.19.1690>.
- Zhu, X., B. Liu, C. Guo, Z. Li, M. Cheng, X. Zhu et Y. Wei. 2023. "Short and long-term association of exposure to ambient black carbon with all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis." *Environ Pollut* 324: 121086. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121086>.

---

# ANNEXES

---

## Annexe 1 : Conclusion du travail préliminaire sur la faisabilité de l'élaboration d'une VTR pour le carbone suie des particules de l'air ambiant et mises à jour

### **Conclusions du travail préliminaire sur la faisabilité de l'élaboration d'une VTR**

Sont reprises ici les conclusions issues d'une première phase d'expertise visant à déterminer la faisabilité de construction des VTR à court et long terme pour le « carbone suie » dans les particules de l'air ambiant extérieur. Ce travail préliminaire a été réalisé de 2018 à 2020.

Ces conclusions se basent sur i) un état des connaissances sur les effets sanitaires liés à l'exposition au « carbone suie », ii) l'identification de plusieurs événements de santé présentant une plausibilité de lien de causalité suffisante pour dériver une VTR et iii) le recensement de plusieurs fonctions concentration-risque dans la littérature épidémiologique présentant un niveau d'intérêt suffisant pour dériver une VTR.

#### Concernant les événements de santé d'intérêt :

Les événements de santé d'intérêt en lien avec une exposition à court terme au « carbone suie » sont l'augmentation du risque de mortalité ou d'hospitalisation pour causes respiratoire et cardiovasculaire, et l'augmentation du risque d'asthme et de sifflements.

Pour une exposition à long terme au « carbone suie », le niveau de preuve est considéré suffisant pour la mortalité toutes causes, la mortalité de causes cardiovasculaires, l'incidence de maladies coronariennes, l'asthme chez l'enfant et le petit poids de naissance.

#### Concernant le recensement de publications issues de la littérature épidémiologique et de fonctions concentration-risque :

Au total, 759 publications sans doublon ont été identifiées pour le « carbone suie ». Après sélection selon les critères définis *a priori*, 22 publications ont été incluses. En particulier, pour la mortalité toutes causes non accidentelles et l'exposition à long terme au « carbone suie », quatre publications étaient identifiées : Strak *et al.* (2021), Hoek *et al.* (2013), Janssen *et al.* (2011) et Yang *et al.* (2019).

#### Concernant les niveaux d'intérêt des fonctions concentration-risque pour dériver des VTR :

Au regard des données disponibles pour l'exposition au « carbone suie », le GT a identifié des fonctions concentration-risque avec un niveau d'intérêt fort pour la construction d'une VTR :

- pour l'exposition à court terme à EC et la mortalité toutes causes ainsi que la mortalité toutes causes cardiovasculaires (Achilleos *et al.* 2017) ;
- pour l'exposition à long terme à Abs et la mortalité toutes causes (Strak *et al.* 2021) ;
- pour l'exposition à long terme à BC et l'incidence de l'asthme chez l'enfant (Khreis *et al.* 2017) ;
- pour l'exposition à long terme à Abs et l'incidence de BPCO (Liu *et al.* 2021b), de pneumonie (MacIntyre *et al.* 2014), d'infarctus du myocarde (Cesaroni *et al.* 2014) et d'AVC (Brunekreef *et al.* 2021) ;

Ainsi que des fonctions avec un niveau d'intérêt modéré pour la construction d'une VTR :

- pour les expositions à court et long terme à EC et la mortalité toutes causes (Hoek *et al.* 2013; Janssen *et al.* 2011) et pour l'exposition gestationnelle à EC et l'incidence du petit poids de naissance (Sun *et al.* 2016) ;

- pour les expositions à court et long terme à BC et la mortalité pour causes cardiovasculaires et pour l'exposition à court terme à BC et les hospitalisations toutes causes cardiovasculaires (Yang *et al.* 2019). Il est à noter que les auteurs réalisent une conversion des données d'EC en BC ;
- pour l'exposition à long terme à Abs et l'incidence d'asthme chez l'adulte (Liu *et al.* 2021a), ainsi que l'incidence de l'hypertension (Fuks *et al.* 2017).

### **Mises à jour**

Certains éléments ou conclusions issus de ce premier travail préliminaire ont été mis à jour ou modifiés dans le présent rapport.

Tout d'abord, le recensement des publications d'intérêt a été mis à jour ; de nouvelles requêtes bibliographiques ont été appliquées et ont permis d'identifier la littérature la plus récente. Les critères d'éligibilité et de sélection ont été adaptés pour permettre d'inclure, le cas échéant, des publications examinant des localisations hors Europe (cf. chapitre 5.4.2).

Plus spécifiquement, la publication de Janssen *et al.* 2011 a finalement été exclue du corpus d'études sur l'exposition à long terme car l'exposition aux fumées noires (BS, *black smoke*) y était considérée – et n'est pas d'intérêt pour la construction de la VTR (cf. chapitre 5.4.2). Après vérification détaillée et prise de contact avec les auteurs, l'analyse de Yang *et al.* (2019) n'applique pas de conversion des données d'EC en BC comme précédemment mentionné.

Enfin, l'incidence d'hypertension en lien avec une exposition à long terme à l'absorbance ne fait plus partie des événements de santé d'intérêt en raison de son caractère quasi infraclinique. L'incidence de pneumonie en lien avec une exposition à long terme à l'absorbance ne fait plus partie des événements de santé d'intérêt en raison de sa forte composante infectieuse.

## Annexe 2 : Liste des appareils conformes pour la surveillance de la fraction carbonée des particules de l'air ambiant

Le Tableau 15 présente le modèle d'appareil conforme à la méthode de référence pour le prélèvement des PM<sub>2,5</sub> en vue de l'analyse de carbone élémentaire (EC), du carbone organique (OC) et des anions.

**Tableau 15. Préleveur séquentiel sur filtre pour gravimétrie en différence pour le prélèvement des PM<sub>2,5</sub> en vue de l'analyse du carbone élémentaire (EC), du carbone organique (OC) et des anions (LCSQA 2020b)**

Constructeur	Modèle d'appareil conforme à la méthode de référence pour le prélèvement des PM <sub>2,5</sub> en vue de l'analyse des anions & cations et du EC & OC
DIGITEL	DA 80

(a) : Il est à la charge de l'organisme responsable du prélèvement (ex : l'AASQA) de vérifier que l'analyse chimique effectuée par le laboratoire qu'il a choisi est conforme à la méthode analytique de référence.

Le Tableau 16 présente les modèles d'appareil mesurant le carbone suie (BC) par absorption de la lumière d'un filtre chargé en particules, qui sont utilisés pour la surveillance opérationnelle de la qualité de l'air ambiant en France.

**Tableau 16. Analyseur par absorption de la lumière d'un filtre chargé en particules (adapté de LCSQA (2020a))**

Constructeur	Modèle d'appareil
Thermo Scientific Inc.	MAAP 5012 Photomètre à absorption multi-angle qui mesure la quantité de lumière (longueur d'onde 637 nm) qui est transmise et renvoyée par un filtre en fibre de verre chargé de particules. Avec un modèle de transfert radiatif, les coefficients d'absorption des particules déposées peuvent être calculés. Le MAAP donne une concentration massique de carbone absorbant la lumière (LAC) qui nécessite la connaissance de l'efficacité d'absorption. Lors de comparaisons instrumentales avec une méthode de référence thermique, les auteurs du MAAP ont dérivé un coefficient d'absorption massique de 6,6 m <sup>2</sup> /g pour les aérosols ruraux et urbains, qui est généralement utilisée pour la conversion de l'absorption lumineuse en concentration massique de « suie ». La longueur d'onde du MAAP (637 nm) correspond à la région du spectre solaire où le carbone suie (BC) est le premier absorbeur, minimisant ainsi les interférences avec le carbone brun et les poussières minérales. Néanmoins, le MAAP n'est plus commercialisé en France.
Magee Scientific	AE33 Instrument qui mesure la concentration de BC en effectuant une mesure de la lumière absorbée des particules prélevées en continu sur une bande filtrante. Un coefficient d'absorption de la lumière par les particules est déterminé en faisant la différence entre des mesures de la transmission lumineuse de la bande filtrante vierge et celle de la bande filtrante avec des particules. Cette analyse est faite à sept longueurs d'ondes réparties entre 370 et 950 nm. L'AE33 calcule les concentrations de BC avec une haute résolution temporelle en analysant l'atténuation de la transmission lumineuse au cours du temps. La mesure de BC est extraite de la mesure du coefficient d'absorption à 880 nm. Les autres longueurs d'onde peuvent notamment être utilisées pour estimer les contributions des différentes sources de combustion. La mesure optique réalisée (coefficient d'absorption en m <sup>-1</sup> ) peut être convertie en concentration massique en µg.m <sup>-3</sup> (alors appelée « équivalent black carbon ») à l'aide d'un coefficient d'absorption massique en m <sup>2</sup> /g, dont le choix reste actuellement sujet de discussion au sein de la communauté scientifique. Plus d'informations sont disponibles dans le <i>guide méthodologique pour la mesure du « black carbon » par aéthalomètre multi-longueur d'onde AE33 dans l'air ambiant</i> . La mesure automatique de BC sur sites urbains avec l'AE33 est à présent intégrée dans la surveillance, pour des objectifs d'études de sources de PM et de suivi à long terme du BC.

BC : carbone suie.

## Annexe 3 : Requêtes bibliographiques

Les requêtes proposées lors de l'analyse préliminaire de la faisabilité d'élaboration des VTR pour le « carbone suie » des particules de l'air ambiant sont les suivantes.

	Requêtes	Résultats* au 9 janvier 2020
Pubmed	<pre> ((((("black carbon"[Title/Abstract]) OR ("elemental carbon"[Title/Abstract]) OR ("soot"[Title/Abstract]) OR ("ec"[Text Word] OR "bc"[Text Word]) OR ("constituent*" [Title/Abstract] OR ("component*" [Title/Abstract]) OR ("specie*" [Title/Abstract]) OR ("composition"[Title/Abstract]))) AND (("particulate matter"[Title/Abstract]) OR "pm*" [Text Word] OR ("aerosol*" [Title/Abstract]) OR ("particle*" [Title/Abstract])) AND (("health"[Title/Abstract]) OR ("outcomes"[Title/Abstract]) OR ("disease"[Title/Abstract]) OR ("mortality"[Title/Abstract]) OR ("morbidity"[Title/Abstract]) OR ("epidemiolog*" [Title/Abstract]) OR ("associat*" [Title/Abstract]) OR ("health"[MeSH]) OR ("epidemiology"[MeSH])) AND ((review[Title/Abstract]) OR ("meta-analysis" [Title/Abstract]) OR ("pool*" [Title/Abstract]) OR ("multicent*" [Title/Abstract]) </pre>	N=322 références **
Scopus	<pre> ( ( TITLE-ABS ( "black carbon" ) OR TITLE-ABS ( "elemental carbon" ) OR TITLE- ABS ( "soot" ) OR TITLE-ABS ( "ec" ) OR TITLE-ABS ( "bc" ) OR ( TITLE-ABS ( "constituent*" ) OR TITLE ABS ( "component*" ) OR TITLE-ABS ( "specie*" ) OR TITLE-ABS ( "composition" ) ) ) AND ( TITLE-ABS ( "particulate matter" ) OR TITLE-ABS ( "pm*" ) OR TITLE-ABS ( "aerosol*" ) OR TITLE-ABS ( "particle*" ) ) AND TITLE-ABS-KEY ( "air pollut*" ) AND ( TITLE-ABS ( "health" ) OR TITLE-ABS ( "outcomes" ) OR TITLE-ABS ( "disease" ) OR TITLE-ABS ( "mortality" ) OR TITLE ABS ( "morbidity" ) OR TITLE- ABS ( "epidemiolog*" ) OR TITLE-ABS ( "associat*" ) OR INDEXTERMS ( "health" ) OR INDEXTERMS ( "epidemiology" ) ) AND ( TITLE-ABS ( review ) OR TITLE-ABS ( "meta-analysis" ) OR TITLE-ABS ( "pool*" ) OR TITLE-ABS ( "multicent*" ) ) ) </pre>	N=566 références **

\* Les volumes décrits ici considèrent une année plancher de publication en 2009. \*\* Luben et al. (2017) et Yang et al. (2019) avaient été préalablement identifiées comme pertinentes par le GT pour les présents travaux. Elles ont bien été retrouvées dans les résultats des requêtes.

Les requêtes ont été mises à jour (ajout des éléments soulignés ci-dessous) et relancées en 2023 afin d'identifier la littérature la plus récemment publiée. Au total, 917 références sans doublons ont été trouvées (sans année plancher), incluant bien les références préalablement identifiées par le GT comme pertinentes pour les présents travaux (Luben *et al.* 2017; Yang *et al.* 2019).

	Requêtes	Résultats au 19 juin 2023
Pubmed	<p>( ("black carbon"[Title/Abstract]) OR ("elemental carbon"[Title/Abstract]) OR ("soot"[Title/Abstract]) OR ("EC"[Text Word] OR "BC"[Text Word]) OR ("constituent*" [Title/Abstract]) OR ("component*" [Title/Abstract]) OR ("specie*" [Title/Abstract]) OR ("composition"[Title/Abstract]) )</p> <p><u>AND ( "air pollut*" [Title/Abstract] OR "air pollut*" [MeSH] )</u></p> <p>AND ( ("particulate matter"[Title/Abstract]) OR ("PM"[Text Word]) OR ("aerosol*" [Title/Abstract]) OR ("particle*" [Title/Abstract]) )</p> <p>AND ( ("health"[Title/Abstract]) OR ("outcomes"[Title/Abstract]) OR ("disease"[Title/Abstract]) OR ("mortality"[Title/Abstract]) OR ("morbidity"[Title/Abstract]) OR ("epidemiolog*" [Title/Abstract]) OR ("associat*" [Title/Abstract]) OR ("health"[MeSH]) OR ("epidemiology"[MeSH]))</p> <p>AND ((review[Title/Abstract]) OR ("systematic review"[Title/Abstract]) OR ("meta-analysis"[Title/Abstract]) OR ("meta-analy*" [Title/Abstract]) OR ("meta analy*" [Title/Abstract]) OR ("pool*" [Title/Abstract]) OR ("multicent*" [Title/Abstract]) OR ("multi-cit*" [Title/Abstract]) OR ("multicit*" [Title/Abstract]))</p>	N=612 références
Scopus	<p>(( TITLE-ABS ( "black carbon" ) OR TITLE-ABS ( "elemental carbon" ) OR TITLE-ABS ( "soot" ) OR TITLE-ABS ( "ec" ) OR TITLE-ABS ( "bc" ) OR ( TITLE-ABS ( "constituent*" ) OR TITLE-ABS ( "component*" ) OR TITLE-ABS ( "specie*" ) OR TITLE-ABS ( "composition" ) )) )</p> <p>AND ( TITLE-ABS ( "particulate matter" ) OR TITLE-ABS ( "pm*" ) OR TITLE-ABS ( "aerosol*" ) OR TITLE-ABS ( "particle*" ) )</p> <p>AND TITLE-ABS-KEY ( "air pollut*" )</p> <p>AND ( TITLE-ABS ( "health" ) OR TITLE-ABS ( "outcomes" ) OR TITLE-ABS ( "disease" ) OR TITLE-ABS ( "mortality" ) OR TITLE-ABS ( "morbidity" ) OR TITLE-ABS ( "epidemiolog*" ) OR TITLE-ABS ( "associat*" ) OR INDEXTERMS ( "health" ) OR INDEXTERMS ( "epidemiology" ) ) )</p> <p>AND ( TITLE-ABS ( review ) OR TITLE-ABS ( "systematic review" ) OR TITLE-ABS ( "meta-analysis" ) OR TITLE-ABS ( "meta-analy*" ) OR TITLE-ABS ( "meta analy*" ) OR TITLE-ABS ( "multicit*" ) OR TITLE-ABS ( "multi-cit*" ) OR TITLE-ABS ( "pool*" ) OR TITLE-ABS ( "multicent*" ) ) )</p>	N=939 références

## **Annexe 4 : Tableaux d'extraction des fonctions concentration-risque et d'analyse du niveau d'intérêt de ces fonctions pour dériver la VTR court terme pour le carbone suie**

Le Tableau 17 de la présente annexe décrit brièvement les publications sélectionnées lors de la recherche bibliographique et inclut l'ensemble des fonctions concentration-risque extraites de ces publications pour décrire la relation entre l'exposition à court terme au « carbone suie » et la survenue des événements de santé d'intérêt. Le Tableau 18 de la présente annexe présente quant à lui les niveaux d'intérêt de ces fonctions pour dériver une VTR.

Tableau 17. Description des fonctions concentration-risque (CR) examinant l'exposition à court terme au « carbone suie » des particules de l'air ambiant

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I²en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
1	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	8 études dont 2 en Europe, lags mixtes	1,006 [1,004-1,009]	1,0	91	0,0061000
2	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	81 villes (4 en Europe) issues de 8 études, lags mixtes	1,006 [1,002-1,01]	1,0	46	0,0060000
3	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 villes (2 en Europe) issues de 3 études, population >65 ans, lags mixtes	1,024 [1,011-1,037]	2,6	NR	0,0089339
4	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 villes en Europe (0 en France) issues de 2 études, lag 1	1,045 [0,996-1,094]	2,6	84	0,0167455
5	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	EC – fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	6 études dont 0 en Europe, lags mixtes	1,013 [1,002-1,024]	1,0	92	0,0129162
6	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 0	1,001 [0,991-1,012]	1,4	NR	0,0007139
7	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,004 [0,994-1,015]	1,4	NR	0,0030648
8	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 2	1,01 [0,998-1,022]	1,4	NR	0,0070932
9	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 0	0,999 [0,956-1,044]	1,1	NR	-0,0012008
10	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,006 [0,98-1,032]	1,1	NR	0,0051671
11	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 2	0,974 [0,947-1,002]	1,1	NR	-0,0235105
12	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Janssen <i>et al.</i> (2011)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	3 études dont 0 en Europe, lags mixtes	1,015 [1,013-1,016]	1,0	NR	0,0143959

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
13	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Levy <i>et al.</i> (2012)	BS, BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	8 études dont 1 en Europe, lags mixtes	1,004 [0,996-1,012]	10,0	ND	0,0003992
14	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	9 études dont 2 en Europe, lag mixtes	1,015 [1,008-1,021]	0,605	17,00	0,0238062
15	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 études dont 1 en Europe, lags mixtes, ajustement sur les PM <sub>2,5</sub>	1,003 [1,001-1,006]	0,605	NR	0,0054456
16	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	5 études dont 1 en Europe, lags mixtes, sans ajustement sur les PM <sub>2,5</sub>	1,003 [0,998-1,008]	0,605	NR	0,0049513
17	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	7 études dont 6 en Europe (1 en France), lags mixtes	1,007 [1,005-1,009]	10,0	42	0,0006976
18	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	7 études dont 6 en Europe (1 en France), lags mixtes, intervalle de prédiction	1,007 [1,005-1,01]	10,0	42	0,0006976
19	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	6 études (5 en Europe), risque de biais considéré faible, lags mixtes	1,008 [1,006-1,01]	10,0	42	0,0007968
20	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	6 études (5 en Europe), risque de biais considéré faible, lags mixtes, intervalle de prédiction	1,008 [1,005-1,011]	10,0	43	0,0007968
21	Hospitalisations toutes causes	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	3 études dont 0 en Europe, lag 0 ou 1 - mélange hospitalisations et de visites aux urgences	1,005 [0,997-1,014]	0,605	8%	0,0089793
22	Hospitalisations toutes causes	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	1 étude, ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> , lag inconnu	1,005 [1,001-1,008]	0,605	NR	0,0075859

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I²en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
23	Hospitalisations toutes causes	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	2 études, <b>sans ajustement</b> sur les PM <sub>2,5</sub> , lags inconnus	0,998 [0,981-1,015]	0,605	NR	-0,0034747
24	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 0	1,014 [0,993-1,036]	1,4	NR	0,0102053
25	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,005 [0,996-1,014]	1,4	NR	0,0037118
26	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 2	0,996 [0,979-1,013]	1,4	NR	-0,0030924
27	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 0	1,029 [1,007-1,052]	1,1	NR	0,0259356
28	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,012 [0,99-1,034]	1,1	NR	0,0109340
29	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 2	0,998 [0,976-1,021]	1,1	NR	-0,0018838
30	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multicentrique	119 contés aux Etats-Unis, lag 0	1,02 [1,009-1,031]	1,0	NA	0,0195733
31	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multicentrique	<b>21</b> contés à <b>l'ouest</b> des Etats Unis, lag 0	1,019 [1,007-1,031]	1,0	NA	0,0188849
32	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multicentrique	98 contés à <b>l'est</b> des Etats Unis, lag 0	1,022 [0,982-1,061]	1,0	NA	0,0215211
33	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	12 études dont 1 en Europe, lags mixtes - mélange hospitalisations, visites aux urgences et admissions	1,003 [1,001-1,006]	1,0	29,7	0,0029955

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I²en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
34	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	9 études dont 1 en Europe, lags mixtes - mélange hospitalisations et de visites aux urgences	1,02 [1,012-1,027]	0,605	0	0,0320831
35	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	3 études dont ? en Europe, <b>avec ajustement sur les PM<sub>2,5</sub>, lags inconnus</b> - mélange hospitalisations et de visites aux urgences	1,013 [1,007-1,02]	0,605	NR	0,0220017
36	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	6 études dont ? en Europe, <b>sans ajustement</b> sur les PM <sub>2,5</sub> , lags inconnus - mélange hospitalisations et de visites aux urgences	1,019 [1,014-1,025]	0,605	NR	0,0314347
37	Santé cardiovasculaire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	3 études dont 0 en Europe, lags mixtes - mélange hospitalisations, visites aux urgences et admissions	1,076 [1,021-1,134]	1,0	64,7	0,073250462
38	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	7 études dont 2 en Europe, lags mixtes	1,006 [1,001-1,008]	1,0	0	0,0057000
39	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	8 villes (3 en Europe) issues de 7 études, lags mixtes	1,006 [1,001-1,01]	1,0	0	0,0057000
40	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	5 études dont 0 en Europe, lags mixtes	1,017 [1,005-1,028]	1,0	97	0,0164637
41	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 0	0,987 [0,971-1,004]	1,4	NR	-0,0090861
42	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 1	0,992 [0,976-1,008]	1,4	NR	-0,0059461

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I²en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
43	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 2	1,017 [1-1,033]	1,4	NR	0,0117247
44	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 0	0,977 [0,938-1,018]	1,1	NR	-0,0207998
45	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,025 [0,934-1,124]	1,1	NR	0,0221995
46	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 2	0,96 [0,912-1,01]	1,1	NR	-0,0372719
47	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Janssen <i>et al.</i> (2011)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	3 études dont 0 en Europe, lags mixtes	1,018 [1,011-1,031]	1,0	NR	0,0175452
48	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	14 études dont 3 en Europe, lags mixtes	1,003 [1,001-1,006]	1,0	29,7	0,0029955
49	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	3 études en Europe, lags mixtes	0,99 [0,979-1,001]	1,0	0	-0,0100503
50	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	11 études dont 2 en Europe, lags mixtes	1,003 [1,001-1,005]	0,605	40,00	0,0051638
51	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 études dont 1 en Europe, lags mixtes, <b>ajustement sur les PM<sub>2,5</sub></b>	1,007 [1,003-1,011]	0,605	NR	0,0120223
52	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	6 études dont 1 en Europe, lag mixtes, <b>sans ajustement sur les PM<sub>2,5</sub></b>	1,004 [1,002-1,006]	0,605	NR	0,0058499
53	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	8 études dont 7 en Europe (1 en France), lags mixtes	1,006 [1,003-1,009]	10,0	38	0,0005982
54	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	8 études dont 7 en Europe (1 en France), lags mixtes, intervalle de prédiction	1,006 [0,998-1,014]	10,0	38	0,0005982
55	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	6 études (5 en Europe), risque de biais considéré faible, lags mixtes	1,005 [1,002-1,009]	10,0	44	0,0004988

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
56	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	6 études (5 en Europe), risque de biais considéré faible, lags mixtes, intervalle de prédiction	1,005 [0,996-1,014]	10,0	44	0,0004988
57	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 0	1,007 [0,995-1,019]	1,4	NR	0,0049116
58	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,002 [0,984-1,021]	1,4	NR	0,0017051
59	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 2	1,008 [0,995-1,021]	1,4	NR	0,0054364
60	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 0	0,985 [0,944-1,028]	1,1	NR	-0,0136843
61	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,026 [1,001-1,052]	1,1	NR	0,0234052
62	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	3 villes en Europe (0 en France), lag 2	1,02 [0,972-1,071]	1,1	NR	0,0182965
63	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multicentrique	119 contés aux Etats-Unis, lag 0	1,005 [0,986-1,024]	1,0	NA	0,0047839
64	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multicentrique	21 contés à <b>l'ouest</b> des Etats Unis, lag 0	1,007 [0,984-1,032]	1,0	NA	0,0072253
65	Santé respiratoire	Hospitalisations pour causes respiratoires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multicentrique	98 contés à <b>l'est</b> des Etats Unis, lag 0	1,005 [0,959-1,053]	1,0	NA	0,0053657
66	Santé respiratoire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Song <i>et al.</i> (2022)	EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	7 études dont 1 en Europe, lags mixtes - mélange hospitalisations, admissions et visites aux urgences	1,012 [0,993-1,03]	1,0	91,8	0,0119286

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I²en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
67	Santé respiratoire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	8 études dont 2 en Europe, lags mixtes - mélange hospitalisations et de visites aux urgences	1,014 [0,991-1,036]	0,605	74	0,0224053
68	Santé respiratoire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 études dont ? en Europe, avec <b>ajustement</b> sur les PM <sub>2,5</sub> , lag inconnus - mélange hospitalisations et de visites aux urgences	1,000 [0,992-1,007]	0,605	NR	-0,0004959
69	Santé respiratoire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 études dont ? en Europe, <b>sans ajustement</b> sur les PM <sub>2,5</sub> , lag inconnus - mélange hospitalisations et de visites aux urgences	1,019 [0,994-1,045]	0,605	NR	0,0312725
70	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	7 études dont 2 en Europe, lags mixtes	1,026 [0,99-1,064]	1,0	68	0,0260000
71	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	8 villes (3 en Europe) issues de 7 études, lags mixtes	1,025 [0,992-1,06]	1,0	63	0,0247000
72	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	4 études dont 0 en Europe, lags mixtes	1,011 [0,984-1,039]	1,0	99	0,0108410
73	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 0	1,022 [0,984-1,062]	1,4	NR	0,0155579
74	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,053 [1,014-1,094]	1,4	NR	0,0368270
75	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 2	1,03 [0,991-1,07]	1,4	NR	0,0209400
76	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 0	0,934 [0,867-1,006]	1,1	NR	-0,0618770

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I²en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
77	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 1	1,025 [0,952-1,104]	1,1	NR	0,0223857
78	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse d'études	2 villes en Europe (0 en France), lag 2	0,98 [0,89-1,08]	1,1	NR	-0,0180137
79	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	10 études dont 2 en Europe, lags mixtes	1,013 [0,997-1,03]	1,0	66,4	0,0129162
80	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	8 études dont 1 en Europe, lags mixtes	1,004 [1-1,009]	0,605	11,30	0,0072436
81	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 études dont 1 en Europe, lag mixtes, <b>ajustement sur les PM<sub>2,5</sub></b>	1,002 [0,997-1,008]	0,605	NR	0,0039622
82	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 études dont 1 en Europe, lag mixtes, <b>sans ajustement sur les PM<sub>2,5</sub></b>	1,026 [0,985-1,068]	0,605	NR	0,0417815
83	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	7 études dont 6 en Europe (2 françaises), lags mixtes	1,008 [1,004-1,013]	10,0	32	0,0007968
84	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	7 études dont 6 en Europe (2 françaises), lags mixtes, intervalle de prédiction	1,008 [1,001-1,016]	10,0	32	0,0007968
85	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	6 études dont 5 en Europe (1 française), risque de biais considéré faible, lags mixtes	1,009 [1,004-1,014]	10,0	41	0,0008960
86	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	6 études dont 5 en Europe (1 française), risque de biais considéré faible, lags mixtes, intervalle de prédiction	1,009 [0,999-1,019]	10,0	41	0,0008960
87	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 0	1,005 [1,003-1,008]	0,5	NA	0,0099751
88	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 1	1 [0,997-1,003]	0,5	NA	0,0000000

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
89	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 2	1,001 [0,998-1,004]	0,5	NA	0,0019990
90	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 3	1,003 [0,999-1,006]	0,5	NA	0,0059910
91	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 4	1,004 [1,001-1,007]	0,5	NA	0,0079840
92	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 5	1,006 [1,001-1,01]	0,5	NA	0,0119641
93	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 6	1,004 [1-1,008]	0,5	NA	0,0079840
94	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag 7	1,003 [0,999-1,007]	0,5	NA	0,0059910
95	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-2	1,005 [1,001-1,008]	0,5	NA	0,0099751
96	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-7	1,01 [1,002-1,018]	0,5	NA	0,0199007
97	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 3-6	1,006 [1-1,012]	0,5	NA	0,0119641
98	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	4 Etats de l' <b>ouest</b> des Etats-Unis, lag cumulé 0-2	1,005 [1-1,01]	0,5	NA	0,0099751
99	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	4 Etats de l' <b>ouest</b> des Etats-Unis, lag cumulé 0-7	1,005 [0,996-1,011]	0,5	NA	0,0099751
100	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	4 Etats de l' <b>ouest</b> des Etats-Unis, lag cumulé 3-6	1,003 [0,995-1,011]	0,5	NA	0,0059910
101	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	6 Etats de l'est des Etats-Unis, lag cumulé 0-2	1,005 [0,999-1,011]	0,5	NA	0,0099751

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
102	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	6 Etats de l'est des Etats-Unis, lag cumulé 0-7	1,017 [1,004-1,031]	0,5	NA	0,0337142
103	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	6 Etats de l'est des Etats-Unis, lag cumulé 3-6	1,011 [1,001-1,021]	0,5	NA	0,0218799
104	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-2, >65 ans	1,012 [1,004-1,02]	0,5	NA	0,0238571
105	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-7, >65 ans	1,018 [1,005-1,032]	0,5	NA	0,0356798
106	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 3-6, >65 ans	1,008 [0,998-1,018]	0,5	NA	0,0159363
107	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-2, de 18 à 49 ans	1,002 [0,997-1,006]	0,5	NA	0,0039960
108	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-7, de 18 à 49 ans	1,005 [0,997-1,012]	0,5	NA	0,0099751
109	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 3-6, de 18 à 49 ans	1,002 [0,995-1,008]	0,5	NA	0,0039960
110	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-2, de 50 à 64 ans	1,008 [0,998-1,018]	0,5	NA	0,0159363
111	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-7, de 50 à 64 ans	1,006 [0,991-1,022]	0,5	NA	0,0119641
112	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 3-6, de 50 à 64 ans	1,003 [0,992-1,015]	0,5	NA	0,0059910
113	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-2, de 1 à 4 ans	1,01 [1,003-1,016]	0,5	NA	0,0199007
114	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-7, de 1 à 4 ans	1,015 [1,005-1,026]	0,5	NA	0,0297772

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I² en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
115	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 3-6, de 1 à 4 ans	1,012 [1,005-1,026]	0,25	NA	0,0477143
116	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-2, de 5 à 17 ans	1,001 [0,993-1,009]	0,5	NA	0,0019990
117	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 0-7, de 5 à 17 ans	1,007 [0,992-1,023]	0,5	NA	0,0139512
118	Santé respiratoire	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multi-centrique	10 Etats aux Etats-Unis, lag cumulé 3-6, de 5 à 17 ans	1,007 [0,996-1,018]	0,5	NA	0,0139512
119	Santé respiratoire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour asthme	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	4 études (0 en Europe), adultes >18 ans, lags mixtes - mélange hospitalisations, visites aux urgences et admissions	1,011 [1-1,021]	1,0	0	0,0109399
120	Santé respiratoire	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour asthme	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	5 études (0 en Europe), enfants de 0 à 18 ans, lags mixtes - mélange hospitalisations, visites aux urgences et admissions	1,021 [1,006-1,035]	1,0	0	0,0207825

BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; CR : concentration-risque ; EC : carbone élémentaire ; NA : non applicable ; ND : non disponible ; NR : non renseigné. I² est une indication de la proportion de variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard. I² varie de 0 % (hétérogénéité nulle) à 100 % (forte hétérogénéité). Le terme lag fait référence au nombre de jour de décalage entre l'exposition et l'évènement de santé.

Tableau 18. Analyse du niveau d'intérêt pour dériver une VTR des fonctions concentration-risque examinant l'exposition à court terme « carbone suie » des particules de l'air ambiant

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
<b>Mortalité toutes causes non accidentelles</b>													
1	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NON	ANCIENNE, INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 8 publications dont 2 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015). Très forte hétérogénéité entre les études (I <sup>2</sup> =91 %). Période de l'étude : 1998-2013. Mélange de métrique (6 études sur EC, 2 études sur BC), mélange de lags (1 ou 0-1 ou 3 ou 0-6). Association statistiquement significative. Qualité de la méta-analyse modérée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 28/34 et qualité modérée des études incluses). L'analyse secondaire examinant les villes plutôt que les études (ligne 2) est privilégiée car l'estimation centrale est similaire et l'intervalle de confiance plus réduit.	FAIBLE
2	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NON	ANCIENNE, INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 1) considérant 81 villes (dont 4 en Europe) issues des 8 publications identifiées précédemment. Hétérogénéité entre les études en baisse (I <sup>2</sup> =46 %) par rapport à l'analyse principale. Association statistiquement significative mise en évidence, avec un intervalle de confiance plus réduit que l'analyse principale. Donc niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR.	MODERE
3	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NR	ANCIENNE & INTERMEDIAIRE	Analyse secondaire à l'analyse précédente (ligne 2) considérant les populations âgées de plus de 65 ans uniquement. Quatre villes considérées, dont 2 en Europe. Hétérogénéité entre les études non renseignée. Période de l'étude : 1998-2010. Association positive et statistiquement significative mise en évidence, de plus forte amplitude que l'analyse principale, donc niveau d'intérêt modéré.	MODERE
4	Mortalité toutes causes non accidentelles	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NON	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse précédente (ligne 2) incluant 4 villes en Europe, issues de 2 publications. Forte hétérogénéité entre les études (I <sup>2</sup> =84 %). Période de l'étude : 2003-2013. Mélange de métrique (1 étude sur EC, 1 étude sur BC), mais pas de mélange de lag (1 uniquement). Association positive, d'amplitude plus élevée que l'analyse principale, mais non statistiquement significative et incluant seulement 2 études (dont Basagaña <i>et al.</i> (2015), considérée par ailleurs dans les présents travaux). Donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
5	Mortalité toutes causes non accidentelles	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	EC – fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	ND	NON	NON	ANCIENNE & INTERMEDIAIRE	Méta-analyse de 6 publications (2 Etats-Unis, 1 Chili, 2 Chine, 1 Corée du Sud). Hétérogénéité très élevée ( $I^2=92\%$ ) entre les études. Période de l'étude : 1995-2009. Les études incluses examinent probablement différents lags, les auteurs ne donnent pas d'informations sur ce point. Métrique étudiée : EC (sans information sur la fraction). Association statistiquement significative. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 17/34). Niveau d'intérêt faible car aucune localisation européenne et qualité de la méta-analyse faible.	FAIBLE
6	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Méta-analyse de 2 villes en Europe (Espagne et Italie). Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>10</sub> ; sur lag 0. Hétérogénéité non renseignée. Période de l'étude : 2003-2010. Ajustement sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Qualité de l'étude fortes selon l'évaluation par l'outil WHO RoB (Confusion : faible risque / Biais de sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Outcome : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE
7	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 6), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag 1. La qualité de l'étude selon l'outil WHO RoB reste inchangée. Niveau d'intérêt faible car pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE
8	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 6), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag 2. La qualité de l'étude selon l'outil WHO RoB reste inchangée. Niveau d'intérêt faible car l'association positive mise en évidence n'atteint pas la significativité statistique (limite).	FAIBLE
9	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 3 villes en Europe (en Espagne et en Italie). Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag 0. Hétérogénéité non renseignée. Période de l'étude : 2003-2013. Ajustement sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Qualité de l'étude forte selon l'évaluation par l'outil WHO RoB (Confusion : faible risque / Biais de sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Outcome : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
10	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 9) considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> sur le lag 1 cette fois. La qualité de l'étude selon l'outil WHO RoB est inchangée (forte). Niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR car pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE
11	Mortalité toutes causes non accidentelles	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 9) considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> sur le lag 2 cette fois. La qualité de l'étude selon l'outil WHO RoB est inchangée (forte). Niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR car pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE
12	Mortalité toutes causes non accidentelles	Janssen <i>et al.</i> (2011)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	ND	NON	ND	NR	Méta-analyse de 3 publications (2 aux Etats-Unis et 1 au Chili). Association positive et statistiquement significative mise en évidence. Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) entre les études non renseignée. Pas d'information sur la période d'étude mais les publications incluses sont assez anciennes (publiées entre 2004 et 2009). Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> . Les études incluses examinent différents lags (0-1, 1 ou 3). Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34) avec un manque général d'information dans la publication. Niveau d'intérêt faible car publications anciennes, peu de publications incluses, qualité faible et pas de localisation européenne.	FAIBLE
13	Mortalité toutes causes non accidentelles	Levy <i>et al.</i> (2012)	BS, BC & EC, fraction non renseignée	OUI		NON	OUI	ND	OUI	ND	NR	Méta-analyse incluant 8 publications dont 1 en Europe (Londres). Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) entre les études non renseignée. Plusieurs métriques sont examinées dans les études princeps (BC, EC et BS) ainsi que plusieurs lags, sans informations détaillées. La méthode mise en œuvre par les auteurs est non explicitée. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 10/34). Association non statistiquement significative.	FAIBLE
14	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	NA	NON	OUI	NON	OUI	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 9 publications dont 2 en Europe, identifiées par une revue de la littérature. Période d'étude : 2000-2013. Analyse principale incluant les études avec et sans ajustement sur les PM <sub>2.5</sub> totaux. Ces études examinent différentes métriques (BC et EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> ) ainsi que différents lags. Hétérogénéité faible (I <sup>2</sup> =17%) entre les études. Association statistiquement significative mise en évidence mais qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34) (notamment en raison du manque d'information dans la publication pour évaluer certains critères) donc niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
15	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 14), incluant uniquement les 4 études (dont 1 en Europe - Basagaña <i>et al.</i> 2015) avec ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux. Différentes métriques (BC et EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> ) ainsi que différents lags. Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) non renseignée. Association positive et statistiquement significative. Niveau d'intérêt inchangé (faible) par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE
16	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 14), incluant uniquement les 5 études sans ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux. Différentes métriques (BC et EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> ) ainsi que différents lags. Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) non renseignée. Association positive à la limite de la significativité statistique. Niveau d'intérêt inchangé (faible) par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE
17	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NR	Méta-analyse de 7 publications dont 6 en Europe (une en France), identifiées par une revue de la littérature. Période d'étude : 1985-2017. Hétérogénéité modérée (I <sup>2</sup> =42 %) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyses examinent différentes métriques (5 études sur BS et 2 études sur BC) ; les auteurs ont exclu de leur sélection les études examinant EC. Différents lags sont combinés dans la méta-analyse, sans précision des auteurs sur ce point. Association statistiquement significative. Qualité de la méta-analyse élevée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 32/34). Néanmoins, niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR en raison de l'obsolescence de la métrique BS (retrouvée en majorité dans la méta-analyse).	FAIBLE
18	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NR	Analyse complémentaire à l'analyse principale (ligne 17), rapportant l'intervalle de prédiction au lieu de l'intervalle de confiance autour de l'estimation centrale du risque. Résultat similaire à celui de l'analyse principale. Niveau d'intérêt inchangé (faible) par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE
19	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 17) n'incluant que les études avec un faible risque de biais. Les résultats confirment ceux de l'analyse principale. Niveau d'intérêt inchangé (faible) par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
20	Mortalité toutes causes non accidentelles	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NR	Analyse complémentaire à l'analyse précédente (ligne 19), rapportant l'intervalle de prédiction au lieu de l'intervalle de confiance autour de l'estimation centrale du risque. Résultat similaire. Niveau d'intérêt inchangé (faible) par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE
<b>Hospitalisations toutes causes</b>													
21	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON	OUI	INTERMÉDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 3 publications (2 aux Etats-Unis et 1 en Chine) identifiées par une revue de la littérature. Période d'étude : 2008-2013. Association positive à la limite de la significativité statistique. Hétérogénéité faible (I <sup>2</sup> =8 %) entre les études incluses dans la méta-analyse. Métriques étudiées : BC et EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> . Différents lags investigués (lag 0 ou 1), les auteurs ont sélectionné les résultats princeps les plus élevés. Les évènements de santé considérés sont hétérogènes entre les études : hospitalisations, admissions et/ou visites aux urgences. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 18/34) notamment en raison du manque d'information dans la publication pour évaluer certains critères.	FAIBLE
22	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	ND	ND	NR	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 21), incluant uniquement une étude (non identifiée par les auteurs) avec ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux. Association statistiquement significative rapportée. Niveau d'intérêt inchangé (faible) par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE
23	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	ND	ND	NR	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 21), incluant uniquement les 2 études sans ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux. Pas d'association mise en évidence. Niveau d'intérêt inchangé (faible) par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
<b>Santé cardiovasculaire</b>													
24	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAR E	Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>10</sub> sur lag <b>0</b> (i.e. même jour que l'évènement de santé). Association positive mais qui n'atteint pas la significativité statistique. Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2013 (avec des différences selon les villes). Cohérence des données de santé bonne (codes CIM similaires) mais limitée (car pratiques et contextes probablement différents entre l'Espagne et l'Italie). Selon l'outil WHO ROB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR car pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE
25	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAR E	Analyse similaire à la précédente (ligne 24) considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag <b>1</b> (i.e. le jour précédent l'évènement de santé). Les résultats sont inchangés par rapport à l'analyse précédente, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
26	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAR E	Analyse similaire à la précédente (ligne 24) considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag <b>2</b> . Les résultats sont inchangés par rapport à l'analyse précédente, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
27	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse d'études dans 3 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>2.5</sub> sur lag <b>0</b> (i.e. même jour que l'évènement de santé). Association positive et statistiquement significative ; similaire après prise en compte des PM en masse (bien que non statistiquement significative). Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2013 (avec des différences selon les villes). Cohérence des données de santé bonne (codes CIM similaires) mais limitée (car pratiques et contextes probablement différents entre l'Espagne et l'Italie). Selon l'outil WHO ROB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt modéré car association statistiquement significative et bonne qualité de l'étude.	MODERE
28	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 27), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> sur le lag <b>1</b> cette fois (i.e. jour précédant l'évènement de santé). Association positive mais qui n'atteint pas la significativité statistique, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
29	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 27), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> sur le lag <b>2</b> cette fois (i.e. deux jours avant l'évènement de santé). Pas d'association mise en évidence, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
30	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE	Etude individuelle multicentrique dans 119 comtés des Etats-Unis. Métrique considérée : carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>2.5</sub> . Seul le lag 0 a été examiné. Qualité de l'étude modérée selon outil WHO ROB, avec un risque de biais de confusion jugé élevé en raison de la non prise en compte de la saison comme facteur de confusion (confusion : élevé / biais de sélection : faible / mesure de l'exposition : faible / mesure d'intérêt : faible / données manquantes : pas d'information dans l'article / report sélectif : faible). Une association positive statistiquement significative mise en évidence donc niveau d'intérêt modéré.	MODERE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
31	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 30), considérant 21 contés à l'ouest des Etats-Unis. Les résultats sont très proches de ceux de l'analyse principale ; cette dernière est privilégiée en raison de sa population plus large (119 contés). Donc niveau d'intérêt moindre ici.	FAIBLE
32	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 30), considérant 98 contés à l'est des Etats-Unis. L'estimation centrale est légèrement plus élevée que celle de l'analyse principale mais l'association n'atteint pas ici la significativité statistique. Donc niveau d'intérêt moindre par rapport à l'analyse principale.	FAIBLE
33	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	NON	NON	OUI	NON	ANCIENNE, INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 12 publications dont 1 en Europe (Basagaña <i>et al.</i> 2015, qui est incluse par ailleurs dans les présents travaux), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité faible (I <sup>2</sup> =29,7 %). Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (10 études sur EC, 1 étude sur BC et 1 étude mixte) ainsi que différents lags. Les événements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34) avec un manque d'informations généralisé pour évaluer la qualité et le niveau d'intérêt.	FAIBLE
34	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	NON	OUI	OUI	NR	Méta-analyse de 9 publications dont 1 en Europe (Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (7 études sur EC, 2 études sur BC) ainsi que différents lags. Les événements de santé considérés sont hétérogènes entre les études : hospitalisations et/ou visites aux urgences. Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) nulle dans la méta-analyse. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34). Une association positive et statistiquement significative est mise en évidence mais les incertitudes sont grandes et limitent l'interprétation. On peut également noter que la seule étude en Europe est considérée par ailleurs dans les présents travaux.	FAIBLE
35	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	NON	NR	NR	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 34), incluant uniquement 3 études (non explicitées par les auteurs) avec ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux. Pas d'information sur la localisation. Conclusion similaire à celle de l'analyse principale (événements de santé hétérogènes, qualité de la méta-analyse faible, mélanges de lags et de métriques) avec des incertitudes supplémentaires (sur les études incluses et la localisation) donc niveau d'intérêt est inchangé (faible).	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
36	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	NON	NR	NR	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 34), incluant uniquement 6 études (non explicitées par les auteurs) sans ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux. Pas d'information sur la localisation. Conclusion similaire à celle de l'analyse principale (événements de santé hétérogènes, qualité de la méta-analyse faible, mélanges de lags et de métriques) avec des incertitudes supplémentaires (sur les études incluses et la localisation) donc niveau d'intérêt est inchangé (faible).	FAIBLE
37	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON	NON	ANCIENNE, INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 3 publications (aucune de localisation européenne) identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité élevée (I <sup>2</sup> =64,7 %) entre les études. Métriques étudiées : BC et EC, pas d'indication de la fraction. Différents lags ont été investigués mais sans précision. Les événements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et/ou visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Une association positive statistiquement significative est mise en évidence. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34) avec notamment un manque d'informations généralisé pour évaluer la qualité et le niveau d'intérêt. Niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR car faible qualité de l'analyse, trois publications uniquement et pas de localisation européenne.	FAIBLE
38	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de publications incluant 7 publications dont 2 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015). Association positive et statistiquement significative mise en évidence. Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) nulle entre les études. Les études incluses examinent majoritairement l'EC (5 études sur EC, 2 études sur BC) et différents lags (0, 0-1, 0-3 ou 0-6). Qualité de la méta-analyse modérée selon l'évaluation par l'outil Moose (score de 28/34 + qualité modérée des études incluses).	MODERE
39	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 38), considérant les résultats par villes (8 villes dont 3 en Europe) au lieu des résultats par publications. Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) nulle entre les études. Le résultat confirme celui de l'analyse principale, le niveau d'intérêt (modérée) est inchangé.	MODERE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
40	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	ND	NON	Non	ANCIENNE & INTERMEDIAIRE	Méta-analyse incluant 5 études (0 en Europe). Hétérogénéité très élevée ( $I^2=97\%$ ) entre les études. Les localisations sont : Etats-Unis, Chili, Chine, Corée du Sud. Les études incluses examinent probablement différents lags, les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ce point. Métrique étudiée : EC (sans information sur la fraction d'intérêt, mais supposée $PM_{2.5}$ ). Association positive statistiquement significative mise en évidence. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34) notamment en raison d'un manque d'information généralisé. Niveau d'intérêt faible car aucune localisation européenne et qualité de la méta-analyse faible.	FAIBLE
41	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction $PM_{10}$	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction $PM_{10}$ sur lag 0 (i.e. même jour que l'évènement de santé) : pas d'association mise en évidence. Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2010 (avec des différences selon les villes). Cohérence des données de santé bonne (codes CIM similaires). Selon l'outil WHO ROB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence.	FAIBLE
42	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction $PM_{10}$	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 41), considérant la métrique EC dans la fraction $PM_{10}$ sur le lag 1 (i.e. le jour précédent l'évènement de santé). Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence.	FAIBLE
43	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction $PM_{10}$	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 41), considérant la métrique EC dans la fraction $PM_{10}$ sur le lag 2 (i.e. deux jours avant l'évènement de santé). Association positive statistiquement significative mise en évidence et qualité de l'étude inchangée (forte) donc niveau d'intérêt modéré.	MODERE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
44	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag <u>0</u> (i.e. même jour que l'évènement de santé) : pas d'association mise en évidence. Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2010 (avec des différences selon les villes). Cohérence des données de santé bonne (codes CIM similaires). Selon l'outil WHO ROB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence.	FAIBLE
45	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 44 considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag <u>1</u> (i.e. jour précédent l'évènement de santé). Association positive mise en évidence mais qui n'atteint pas la significativité statistique donc niveau d'intérêt reste inchangé (faible).	FAIBLE
46	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 44) considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag <u>2</u> (i.e. deux jours avant l'évènement de santé). Pas d'association mise en évidence donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
47	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Janssen <i>et al.</i> (2011)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NR	NON	NR	INTERMEDIAIRES	Méta-analyse de 3 études (2 aux Etats-Unis et 1 au Chili). Hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) entre les études non renseignée. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> . Les études incluses examinent différents lags (0-1, 1 ou 3). Période d'étude : 2000-2009. Association positive et statistiquement significative mise en évidence. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34) avec un manque général d'information dans la publication. Niveau d'intérêt faible car peu de publications incluses, qualité faible et pas de localisation européenne.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
48	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse incluant 14 études dont 3 en Europe (Grèce, Italie, Espagne et Royaume-Uni) (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité modérée (I <sup>2</sup> =30 %) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyses examinent différentes métriques (8 études sur EC, 5 études sur BC et 1 étude mixte) ainsi que différents lags. Association positive et statistiquement significative mise en évidence. Incertitudes quant à la définition des évènements de santé dans les études princeps ; les auteurs utilisent la formulation « mortalité pour maladies cardiovasculaires », sans définition précise. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34) avec un manque d'information généralisé pour évaluer la qualité et le niveau d'intérêt.	FAIBLE
49	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse complémentaire à l'analyse principale (ligne 48) n'incluant que les localisations européennes (3 études en Grèce, Italie, Espagne et au Royaume-Uni). Pas d'association mise en évidence dans cette analyse. Les limites de l'analyse principale sont également présentes ici (incertitudes sur la définition de l'évènement de santé, mélanges de lags et de métriques, qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose). Niveau d'intérêt inchangé.	FAIBLE
50	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de publications : 11 publications incluses dans la méta-analyse dont 2 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Ces études examinent différentes métriques (6 études sur EC, 2 études sur BC) ainsi que différents lags (le lag correspondant au risque le plus élevé a été considéré par les auteurs). Hétérogénéité modérée (I <sup>2</sup> =40 %). Association positive et statistique significative mise en évidence. Période d'étude : 2000-2013. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34). Niveau d'intérêt faible en raison de la qualité faible de l'analyse.	FAIBLE
51	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 50) considérant uniquement les publications incluant un ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> en masse (4 études dont 1 en Europe). Période d'étude : 2003-2013. Résultat légèrement supérieur à celui de l'analyse principale mais hétérogénéité non renseignée et mêmes limites identifiées (mélanges de lags et de métriques et qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose).	FAIBLE
52	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 50) considérant uniquement les publications n'incluant pas d'ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> en masse (6 études dont 1 en Europe). Période d'étude : 2000-2010. Résultat similaire à celui de l'analyse principale mais hétérogénéité non renseignée et mêmes limites identifiées (mélanges de lags et de métriques, qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose).	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
53	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	ANCIENNE, INTERMÉDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 8 publications dont 7 en Europe (une en France), identifiées par une revue de la littérature. Faible hétérogénéité ( $I^2=38\%$ ) entre les études. Différents lags sont combinés dans la méta-analyse, sans précision des auteurs. Période d'étude : 1985-2017. Presque toutes les études incluses (n=7) considèrent la métrique BS (la dernière considère BC) ; les auteurs ont en particulier exclu de leur sélection les études examinant EC. Le BS n'a pas été retenu comme d'intérêt pour la construction de la VTR en raison de l'ancienneté des données et de l'obsolescence de la méthode de mesure datant de la fin des années 1960. Qualité de la méta-analyse élevée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 32/34).	FAIBLE
54	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	ANCIENNE, INTERMÉDIAIRE & RECENTE	Analyse complémentaire à l'analyse principale (ligne 53) présentant l'intervalle de prédiction. Ce dernier est légèrement plus large que l'intervalle de confiance, l'association perd donc sa significativité statistique. Les mêmes limites que l'analyse principale sont retrouvées ici, en particulier l'utilisation majoritaire de la métrique BS dans la méta-analyse.	FAIBLE
55	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	ANCIENNE, INTERMÉDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 53) n'incluant que les 6 études (5 en Europe) avec un risque de biais considéré comme faible par les auteurs. Résultat similaire à celui de l'analyse principale, avec une association positive et statistiquement significative mise en évidence. Les mêmes limites que l'analyse principale sont retrouvées ici, en particulier l'utilisation majoritaire de la métrique BS dans la méta-analyse.	FAIBLE
56	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	ANCIENNE, INTERMÉDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 53) n'incluant que les 6 études (5 en Europe) avec un risque de biais considéré comme faible par les auteurs. Intervalle de prédiction présenté ici. Ce dernier est légèrement plus large que l'intervalle de confiance, l'association perd donc sa significativité statistique. Les mêmes limites que l'analyse principale sont retrouvées, en particulier l'utilisation majoritaire de la métrique BS dans la méta-analyse.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
<b>Santé respiratoire</b>													
57	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>10</sub> sur lag 0 (i.e. même jour que l'évènement de santé) : pas d'association mise en évidence. Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2010 (avec des différences selon les villes). Cohérence des données de santé bonne (codes CIM similaires). Selon l'outil WHO RoB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence.	FAIBLE
58	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 57), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag 1 (i.e. le jour précédent l'évènement de santé). Qualité de l'étude est inchangée (forte) mais pas d'association mise en évidence donc niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR.	FAIBLE
59	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 57), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag 2 (i.e. deux jours avant l'évènement de santé). Qualité de l'étude est inchangée (forte) mais pas d'association mise en évidence donc niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR.	FAIBLE
60	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse d'études dans 3 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag 0 (i.e. même jour que l'évènement de santé) : pas d'association mise en évidence. Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2010 (avec des différences selon les villes). Cohérence des données de santé bonne (codes CIM similaires). Selon l'outil WHO ROB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
61	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 60), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> sur le lag 1 cette fois (i.e. le jour précédent l'évènement de santé). La qualité de l'étude est inchangée (forte) et une association positive statistiquement significative est rapportée donc niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR.	MODERE
62	Hospitalisations pour causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 60), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> sur le lag 2. L'association positive mise en évidence n'atteint pas la significativité statistique donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
63	Hospitalisations pour causes respiratoires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE	Etude individuelle multicentrique dans 119 contés des Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> . Seul le lag 0 a été examiné. Qualité de l'étude modérée selon outil WHO RoB, avec un risque de biais de confusion jugé élevé en raison de la non prise en compte de la saison comme facteur de confusion (confusion : élevé / biais de sélection : faible / mesure de l'exposition : faible / mesure d'intérêt : faible / données manquantes : pas d'information dans l'article / report sélectif : faible). Une association positive est rapportée mais n'atteint pas la significativité statistique et la localisation est hors Europe donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
64	Hospitalisations pour causes respiratoires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 63), considérant 21 contés à l'ouest des Etats-Unis. Les résultats sont similaires à l'analyse principale donc le niveau d'intérêt est inchangé (faible).	FAIBLE
65	Hospitalisations pour causes respiratoires	Levy <i>et al.</i> (2012)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 63), considérant 98 contés à l'est des Etats-Unis. Les résultats sont similaires à l'analyse principale donc le niveau d'intérêt est inchangé (faible).	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
66	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Song <i>et al.</i> (2022)	EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	NON	NON	OUI	NON	ANCIENNE, INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 7 publications dont 1 en Europe (Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité élevée ( $I^2=91,8\%$ ) entre les études. Métrique étudiée : EC, sans indication de la fraction. Différents lags ont été investigués mais sans précision. Les évènements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 24/34) avec notamment un manque d'information généralisé dans la publication pour évaluer la qualité et le niveau d'intérêt.	FAIBLE
67	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction $PM_{2,5}$	OUI	OUI	NON	NON	NON	OUI	NON	NR	Méta-analyse de 8 publications (dont 2 en Europe), identifiées par une revue de la littérature. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (6 études sur EC, 2 études sur BC) ainsi que différents lags. Les évènements de santé considérés sont hétérogènes entre les études (hospitalisations, admissions et visites aux urgences). Hétérogénéité élevée ( $I^2=74\%$ ) entre les études. Association positive qui n'atteint pas la significativité statistique. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34). Niveau d'intérêt faible car qualité faible, mélanges de lags et de métriques, évènements de santé hétérogène et association non statistiquement significative.	FAIBLE
68	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction $PM_{2,5}$	OUI	OUI	NON	NON	NON	NR	NR	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 67) considérant uniquement les publications incluant un ajustement sur les $PM_{2,5}$ en masse (4 études, non explicitées par les auteurs). Pas d'information sur la localisation. Résultat similaire à l'analyse principale, mêmes limites identifiées (mélanges de lags et de métriques, qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose, pas d'association mise en évidence) ainsi que de nouvelles (pas d'information sur les études incluses et leurs localisations, hétérogénéité ( $I^2$ ) non renseignée).	FAIBLE
69	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction $PM_{2,5}$	OUI	OUI	NON	NON	NON	NR	NR	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 67) considérant uniquement les publications sans ajustement sur les $PM_{2,5}$ en masse (4 études, non explicitées par les auteurs). Pas d'information sur la localisation. Résultat similaire à l'analyse principale, mêmes limites identifiées (mélanges de lags et de métriques, qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose, pas d'association mise en évidence) ainsi que de nouvelles (pas d'information sur les études incluses et leurs localisations, hétérogénéité ( $I^2$ ) non renseignée).	FAIBLE
70	Mortalité toutes causes respiratoires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction $PM_{2,5}$	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NON	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de publications incluant 7 publications dont 2 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015). Hétérogénéité ( $I^2 = 68\%$ ) forte entre les études. Les études incluses examinent majoritairement l'EC (5 études sur EC, 2 études sur BC) mais différents lags (0, 0-1, 0-3 ou 0-6). Qualité de la méta-analyse modérée selon l'évaluation par l'outil Moose (score de 28/34 + qualité modérée des études incluses). Niveau d'intérêt faible car l'association positive mise en évidence n'atteint pas la significativité statistique.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
71	Mortalité toutes causes respiratoires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NON	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 71), considérant les résultats par villes (8 villes dont 3 en Europe) au lieu des résultats par publications. Le résultat confirme celui de l'analyse principale, le niveau d'intérêt (modérée) est inchangé.	FAIBLE
72	Mortalité toutes causes respiratoires	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NR	NON	NON	ANCIENNE & INTERMEDIAIRE	Méta-analyse incluant 4 études (0 en Europe). Hétérogénéité très élevée (I <sup>2</sup> =99 %) entre les études. Les localisations sont : Etats-Unis, Chili, Chine, Corée du Sud. Les études incluses examinent probablement différents lags, les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ce point. Métrique étudiée : EC (sans information sur la fraction d'intérêt, mais supposée PM <sub>2,5</sub> ). Pas d'association mise en évidence. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34) notamment en raison d'un manque d'information généralisé. Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence.	FAIBLE
73	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>10</sub> sur lag 0 (i.e. même jour que l'évènement de santé) : association positive mais qui n'atteint pas la significativité statistique. Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2010 (avec des différences selon les villes). Coherence des données de santé bonne (codes CIM similaires). Selon l'outil WHO ROB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car l'association n'atteint pas la significativité statistique.	FAIBLE
74	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 73), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag 1 cette fois (i.e. le jour précédent l'évènement de santé). La qualité de l'étude est inchangée (forte) et l'association rapportée est statistiquement significative donc niveau d'intérêt modéré.	MODERE
75	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>10</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 73), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>10</sub> sur le lag 2 (i.e. deux jours avant l'évènement de santé). Association positive mais qui n'atteint pas la significativité statistique donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
76	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Carbone élémentaire dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag 0 (i.e. même jour que l'évènement de santé) : pas d'association positive mise en évidence. Ajustement fait sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Période d'étude : 2003-2010 (avec des différences selon les villes). Cohérence des données de santé bonne (codes CIM similaires). Selon l'outil WHO ROB, la qualité de l'analyse est élevée avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine (Confusion : faible risque / Sélection : risque modéré / Exposition : risque faible / Evènement de santé : risque faible / Données manquantes : risque modéré / Hypothèses rapportées : risque faible). Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence.	FAIBLE
77	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 76), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag 1 (i.e. jour précédent l'évènement de santé). La qualité de l'étude est inchangée (forte) mais l'association rapportée n'atteint pas la significativité statistique donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
78	Mortalité toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse similaire à la précédente (ligne 76), considérant la métrique EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag 2 (i.e. deux jours avant l'évènement de santé). La qualité de l'étude est inchangée (forte) mais pas d'association mise en évidence, donc niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR.	FAIBLE
79	Mortalité toutes causes respiratoires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NON	ANCIENNE, INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse incluant 10 publications dont 2 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité élevée (I <sup>2</sup> =66 %) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyses examinent différentes métriques (6 études sur EC, 3 études sur BC et 1 étude mixte) ainsi que différents lags. Incertitudes quant à la définition des évènements de santé dans les études princeps ; les auteurs utilisent la formulation « mortalité pour maladies respiratoires », sans définition précise. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34) avec notamment un manque d'information généralisé dans la publication pour évaluer la qualité et le niveau d'intérêt. Malgré l'association positive et statistiquement significative mise en évidence, le niveau d'intérêt est faible car les incertitudes sont trop nombreuses.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
80	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	NA	NON	OUI	NON	OUI	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse incluant 8 publications dont 1 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques ainsi que différents lags. Hétérogénéité faible (I <sup>2</sup> =11,3 %) entre les études incluses dans la méta-analyse. Période d'étude : 2000-2013. Association positive et presque statistiquement significative. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34). Niveau d'intérêt faible au vu des incertitudes et limites (mélanges de lags et de métriques, qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose, association non statistiquement significative)	FAIBLE
81	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NR	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80) considérant uniquement les 4 publications (non explicitées par les auteurs) incluant un ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> en masse. Pas d'information sur la localisation. Estimation du risque supérieure à celle de l'analyse principale mais mêmes limites identifiées (mélanges de lags et de métriques, qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose, pas d'association statistiquement significative) ainsi que de nouvelles (pas d'information sur les études incluses et leurs localisations, hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) non renseignée).	FAIBLE
82	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	NR	INTERMEDIAIRE	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80) considérant uniquement les 4 publications (non explicitées par les auteurs) sans ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> en masse. Pas d'information sur la localisation. Estimation du risque supérieure à celle de l'analyse principale mais mêmes limites identifiées (mélanges de lags et de métriques, qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose, pas d'association statistiquement significative) ainsi que de nouvelles (pas d'information sur les études incluses et leurs localisations, hétérogénéité (I <sup>2</sup> ) non renseignée).	FAIBLE
83	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NR	Méta-analyse de 7 publications dont 6 en Europe (deux en France), identifiées par une revue de la littérature. Faible hétérogénéité (I <sup>2</sup> =32 %) entre les études. Différents lags sont combinés dans la méta-analyse, sans précision des auteurs. Période d'étude : 1985-2017. Presque toutes les études incluses (n=7) considèrent la métrique BS (la plus récente considère BC) ; les auteurs ont en particulier exclu de leur sélection les études examinant EC. Le BS n'a pas été retenu comme d'intérêt pour la construction de la VTR en raison de l'ancienneté des données et de l'obsolescence de la méthode de mesure datant de la fin des années 1960. Qualité de la méta-analyse élevée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 32/34). Association positive statistiquement significative mise en évidence. Niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR en raison de l'inclusion majoritaire de la métrique BS.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
84	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NR	Analyse complémentaire à l'analyse principale (ligne 83) présentant l'intervalle de prédiction. Ce dernier est légèrement plus large que l'intervalle de confiance, l'association conserve la significativité statistique. Les mêmes limites que l'analyse principale sont retrouvées ici, en particulier l'utilisation majoritaire de la métrique BS dans la méta-analyse. Donc niveau d'intérêt faible pour dériver une VTR.	FAIBLE
85	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	NR	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 83) n'incluant que les 6 études (5 en Europe) avec un risque de biais considéré comme faible par les auteurs. Résultat similaire à celui de l'analyse principale, avec une association positive et statistiquement significative mise en évidence. Les mêmes limites que l'analyse principale sont retrouvées ici, en particulier l'utilisation majoritaire de la métrique BS dans la méta-analyse.	FAIBLE
86	Mortalité toutes causes respiratoires	Zhu <i>et al.</i> (2023)	BC & BS, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	OUI	ANCIENNES (+), INTERMÉDIAIRES ET RECENTES (-)	Analyse complémentaire à la précédente (ligne 85) présentant l'intervalle de prédiction au lieu de l'intervalle de confiance. Ce dernier est légèrement plus large que l'intervalle de confiance, l'association perd donc sa significativité statistique. Les mêmes limites que l'analyse principale sont retrouvées, en particulier l'utilisation majoritaire de la métrique BS dans la méta-analyse.	FAIBLE
87	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMÉDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 10 Etats aux Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur lag 0. Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population générale (tous âges). <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible, biais de sélection : faible, mesure de l'exposition : faible, mesure d'intérêt : faible, données manquantes : faible, rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt modéré</b> car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence.	MODERE
88	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMÉDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag 1. Pas d'association mise en évidence et localisation hors Europe donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
89	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag <b>2</b> . Pas d'association mise en évidence et localisation hors Europe donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
90	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag <b>3</b> . Pas d'association mise en évidence et localisation hors Europe donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
91	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag <b>4</b> . Niveau d'intérêt modéré car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence et ce, malgré l'absence de localisation européenne.	MODERE
92	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag <b>5</b> . Niveau d'intérêt modéré car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence et ce, malgré l'absence de localisation européenne.	MODERE
93	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag <b>6</b> . Niveau d'intérêt modéré car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence et ce, malgré l'absence de localisation européenne.	MODERE
94	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag <b>7</b> . Niveau d'intérêt faible car pas d'association mise en évidence et absence de localisation européenne.	FAIBLE
95	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag cumulé <b>0-2</b> . Niveau d'intérêt modéré car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence et ce, malgré l'absence de localisation européenne.	MODERE
96	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag cumulé <b>0-7</b> . Niveau d'intérêt modéré car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence et ce, malgré l'absence de localisation européenne.	MODERE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
97	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 87), considérant le lag cumulé <b>3-6</b> . Niveau d'intérêt modéré car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence et ce, malgré l'absence de localisation européenne.	MODERE
98	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 4 Etats de l'Ouest des Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur un lag cumulé 0-2. Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population générale (tous âges). <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible, biais de sélection : faible, mesure de l'exposition : faible, mesure d'intérêt : faible, données manquantes : faible, rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt modéré</b> car bonne qualité de l'étude et association statistiquement significative rapportée. Une limite : localisation hors Europe.	MODERE
99	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 98) considérant le lag cumulé 0-7. Niveau d'intérêt faible car localisation hors Europe et pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE
100	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 98) considérant le lag cumulé 3-6. Niveau d'intérêt faible car localisation hors Europe et pas d'association statistiquement significative mise en évidence.	FAIBLE
101	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 6 Etats de l'Est des Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur un lag cumulé 0-2. Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population générale (tous âges). <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible, biais de sélection : faible, mesure de l'exposition : faible, mesure d'intérêt : faible, données manquantes : faible, rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt faible</b> car pas d'association statistiquement significative mise en évidence et localisation hors Europe.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
102	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédent (ligne 101), considérant le lag cumulé 0-7. Niveau d'intérêt modéré car qualité de l'étude élevée et association positive statistiquement significative mise en évidence.	MODERE
103	Visites aux urgences pour asthme	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédent (ligne 101), considérant le lag cumulé 3-6. Niveau d'intérêt modéré car qualité de l'étude élevée et association positive statistiquement significative mise en évidence.	MODERE
104	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 10 Etats aux Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur un lag cumulé 0-2. Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population d'adultes âgés de +65 ans. <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible, biais de sélection : faible, mesure de l'exposition : faible, mesure d'intérêt : faible, données manquantes : faible, rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt modéré</b> car qualité de l'étude élevée et association positive statistiquement significative mise en évidence.	MODERE
105	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 104), considérant le lag cumulé 0-7. Niveau d'intérêt modéré car étude de bonne qualité et association statistiquement significative mise en évidence et ce, malgré l'absence de localisation européenne.	MODERE
106	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 104), considérant le lag cumulé 3-6. La qualité de l'étude est inchangée (élevée) mais pas d'association mise en évidence, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multicentrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Coherence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
107	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi et al. (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 10 Etats aux Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur un lag cumulé <b>0-2</b> . Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population d'adultes âgés de 18 à 49 ans. <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible, biais de sélection : faible, mesure de l'exposition : faible, mesure d'intérêt : faible, données manquantes : faible, rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt faible</b> car association non statistiquement significative et localisation hors Europe.	FAIBLE
108	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi et al. (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 107), considérant le lag cumulé <b>0-7</b> . Les résultats sont similaires à l'analyse précédente, donc niveau d'intérêt reste inchangé (faible).	FAIBLE
109	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi et al. (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 107), considérant le lag cumulé <b>3-6</b> . Les résultats sont similaires à l'analyse précédente, donc niveau d'intérêt reste inchangé (faible).	FAIBLE
110	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi et al. (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 10 Etats aux Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur un lag cumulé <b>0-2</b> . Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population d'adultes âgés de 50 à 64 ans. <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible, biais de sélection : faible, mesure de l'exposition : faible, mesure d'intérêt : faible, données manquantes : faible, rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt faible</b> car pas d'association statistiquement significative mise en évidence et localisation hors Europe.	FAIBLE
111	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi et al. (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 110), considérant le lag cumulé <b>0-7</b> . Les résultats sont similaires à l'analyse précédente, donc niveau d'intérêt reste inchangé (faible).	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multicentrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
112	Visites aux urgences pour asthme (adultes)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 100), considérant le lag cumulé <b>3-6</b> . Les résultats sont similaires à l'analyse précédente, donc niveau d'intérêt reste inchangé (faible).	FAIBLE
113	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 10 Etats aux Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur un lag cumulé <b>0-2</b> . Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population d'enfants âgés de 1 à 4 ans. <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible / biais de sélection : faible / mesure de l'exposition : faible / mesure d'intérêt : faible / données manquantes : faible / rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt modéré</b> car étude de bonne qualité et association positive statistiquement significative mise en évidence.	MODERE
114	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 113), considérant le lag cumulé <b>0-7</b> . Les résultats sont similaires à l'analyse précédente, donc niveau d'intérêt reste inchangé (modéré).	MODERE
115	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 113), considérant le lag cumulé <b>3-6</b> . Les résultats sont similaires, donc niveau d'intérêt reste inchangé (modéré).	MODERE
116	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Etude individuelle multicentrique incluant 10 Etats aux Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> sur un lag cumulé <b>0-2</b> . Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Période d'étude : 2005-2014. Analyse réalisée dans la population d'enfants âgés de 5 à 17 ans. <b>Qualité de l'étude élevée</b> selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles (facteurs de confusion : faible, biais de sélection : faible, mesure de l'exposition : faible, mesure d'intérêt : faible, données manquantes : faible, rapport sélectif : faible). <b>Niveau d'intérêt faible</b> car pas d'association statistiquement significative mise en évidence et localisation hors Europe.	FAIBLE
117	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 116), considérant le lag cumulé <b>0-7</b> . L'estimation centrale est légèrement plus élevée mais n'atteint pas la significativité statistique, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

N	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Méta-analyse, analyse multi-centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Risque associé à un lag bien précis ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta-analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
118	Visites aux urgences pour asthme (enfants)	Bi <i>et al.</i> (2023)	EC fraction PM <sub>2.5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	NA	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Analyse similaire à la précédente (ligne 116), considérant le lag cumulé <b>3-6</b> . L'estimation centrale est légèrement plus élevée mais n'atteint pas la significativité statistique, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
119	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour asthme	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 4 publications examinant des populations d'adultes (>18 ans), identifiées suite à une revue de la littérature. Aucune localisation européenne recensée. Période d'étude : 1998-2012. Hétérogénéité nulle (I <sup>2</sup> =0 %) entre les études. Mélange de métrique : BC et EC, pas d'indication sur la fraction. Différents lags investigués dans les études mais sans précision. Les évènements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 24/34) avec notamment un manque d'information généralisé pour évaluer la qualité et le niveau d'intérêt.	FAIBLE
120	Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour asthme	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC, fraction non renseignée	OUI	OUI	NON	NON	NON	NON	OUI	INTERMEDIAIRE & RECENTE	Méta-analyse de 5 publications examinant des populations d'enfants (0-18 ans), identifiées suite à une revue de la littérature. Aucune localisation européenne recensée. Période d'étude : 1993-2014. Hétérogénéité nulle (I <sup>2</sup> =0 %) entre les études. Métriques étudiées : BC et EC, pas d'indication sur la fraction. Différents lags investigués dans les études mais sans précision. Les évènements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Les types d'études sont également hétérogènes dans la méta-analyse (séries temporelles, cas-croisés ou cohortes). Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 24/34) avec notamment un manque d'information généralisé, voir des incohérences, pour évaluer la qualité et le niveau d'intérêt.	FAIBLE

BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; NA : non applicable ; NR : non renseigné. I<sup>2</sup> est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard. I<sup>2</sup> varie de 0 % (hétérogénéité nulle) à 100 % (forte hétérogénéité). Le terme lag fait référence au nombre de jour de décalage entre l'exposition et l'évènement de santé.

## **Annexe 5 : Extraction des fonctions concentration-risque et calcul des excès de risque journalier pour les évènements de santé autres que hospitalisations pour causes cardiovasculaires pour dériver la VTR court terme**

Cette annexe décrit les fonctions concentration-risque extraites des publications retenues et le résultat graphique du calcul des excès de risque journalier (EDR) en fonction d'une exposition à des concentrations moyennes journalières de « carbone suie » pour les évènements de santé suivants :

- pour la santé cardiovasculaire : mortalité toutes causes cardiovasculaires, hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive ;
- pour la santé respiratoire : mortalité toutes causes respiratoires, hospitalisations toutes causes respiratoires, visites aux urgences pour asthme ;
- pour la mortalité toutes causes non accidentelles.

Le Tableau 26 (en page 165) décrit de manière synthétique les étapes menant à la dérivation des valeurs candidates (nombre de références identifiées, fonctions concentration-risque extraites, référence sélectionnée comme étude clé, approche utilisée pour la dérivation de l'EDR et données de santé utilisées pour caractériser le risque de fond).

Pour certains évènements de santé initialement retenus comme d'intérêt (cf. chapitre 6.1), seules les étapes d'extraction et de qualification du niveau d'intérêt ont été réalisées car les fonctions concentration-risque pour ces évènements ont été qualifiées d'intérêt « faible » pour dériver une VTR. Il s'agit i) des hospitalisations, admissions ou visites aux urgences pour insuffisance cardiaque congestive, ii) des hospitalisations, admissions ou visites aux urgences toutes causes non accidentelles et iii) des hospitalisations, admissions ou visites aux urgences pour asthme.

Aucune fonction concentration-risque n'a été recensée pour les évènements de santé suivants : hospitalisations pour cause BPCO, hospitalisations pour cause infection respiratoire, hospitalisations pour cause maladie cardiaque ischémique, hospitalisations pour cause infarctus et/ou évènements coronariens, hospitalisations pour cause AVC.

Pour rappel, 9 publications ont été identifiées par nos recherches bibliographiques et examinaient l'exposition à court terme au « carbone suie » en lien avec l'un des évènements de santé d'intérêt.

**Mortalité toutes causes non accidentelles**

La mortalité toutes causes non accidentelles était examinée dans sept publications en lien avec une exposition à court terme au « carbone suie ». Une description synthétique de ces publications est visible dans le Tableau 19.

**Tableau 19. Description synthétique (par ordre alphabétique) des sept publications identifiées pour la mortalité toutes causes non accidentelles en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Mortalité toutes causes non accidentelles	(Achilleos <i>et al.</i> 2017)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 8 études dont 2 en Europe. Association positive et statistiquement significative. Hétérogénéité très forte entre les études (91 %). Une analyse secondaire par villes (81 villes dont 4 en Europe) montre des résultats similaires. Les études incluses examinent majoritairement l'EC (6 études sur EC, 2 études sur BC) et différents lags (1, 0-1, 3 ou 0-6). Des analyses stratifiées ont également été réalisées : en Europe uniquement et chez les plus de 65 ans. Qualité de la méta-analyse modérée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 28/34).
	(Atkinson <i>et al.</i> 2015)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 6 études dont 0 en Europe. Hétérogénéité très élevée ( $I^2=92\%$ ) entre les études. Les études incluses examinent probablement différents lags, les auteurs ne donnent pas d'informations sur ce point. Métrique étudiée : EC (sans information sur la fraction). Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 17/34).
	(Basagaña <i>et al.</i> 2015)	Méta-analyse d'études Méta-analyse d'études dans 2 ou 3 villes (selon la fraction) en Espagne et en Italie. Hétérogénéité ( $I^2$ ) non renseignée. Carbone élémentaire dans les fractions PM <sub>10</sub> et PM <sub>2,5</sub> considéré. Plusieurs lags examinés pour chaque métrique, de 0 à 2. Ajustement sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Sur l'ensemble des analyses réalisées, aucune ne rapporte d'association statistiquement significative. Qualité de la méta-analyse forte selon outil WHO ROB avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine.
	(Janssen <i>et al.</i> 2011)	Méta-analyse de publications Méta-analyse de 3 études (2 aux Etats-Unis et 1 au Chili). Hétérogénéité ( $I^2$ ) entre les études non renseignée. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> . Les études incluses examinent différents lags (0-1, 1 ou 3). Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34).
	(Levy <i>et al.</i> 2012)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 8 études dont 1 en Europe. Hétérogénéité ( $I^2$ ) entre les études non renseignée. Plusieurs métriques sont examinées dans les études princeps (BC, EC et BS) ainsi que plusieurs lags, sans informations détaillées. La méthode mise en œuvre par les auteurs est non explicitée. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 10/34).
	(Yang <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de publications 9 études incluses dans la méta-analyse dont 2 en Europe, identifiées par une revue de la littérature. Ces études examinent différentes métriques (7 études sur EC, 2 études sur BC) ainsi que différents lags. Hétérogénéité faible ( $I^2=17\%$ ). Association positive et statistique significative, qui diminue légèrement d'amplitude en analyse de sensibilité (i.e. incluant les études ajustant ou non sur les PM <sub>2,5</sub> totaux). Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34).
	(Zhu <i>et al.</i> 2023)	Méta-analyse de publications Méta-analyse de 7 études dont 6 études en Europe (une en France), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité modérée ( $I^2=40\%$ ) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (5 études sur BS et 2 études sur BC) ; les auteurs ont exclu de leur sélection les études examinant EC. Différents lags sont combinés dans la méta-analyse, sans précision des auteurs sur ce point. Les résultats sont similaires dans l'analyse de sensibilité n'incluant que les études avec un faible risque de biais ( $I^2=42\%$ ). Pour chacune des analyses statistiques, une estimation de l'intervalle de confiance et de l'intervalle de prédiction a été réalisée. Qualité de la méta-analyse élevée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 32/34).

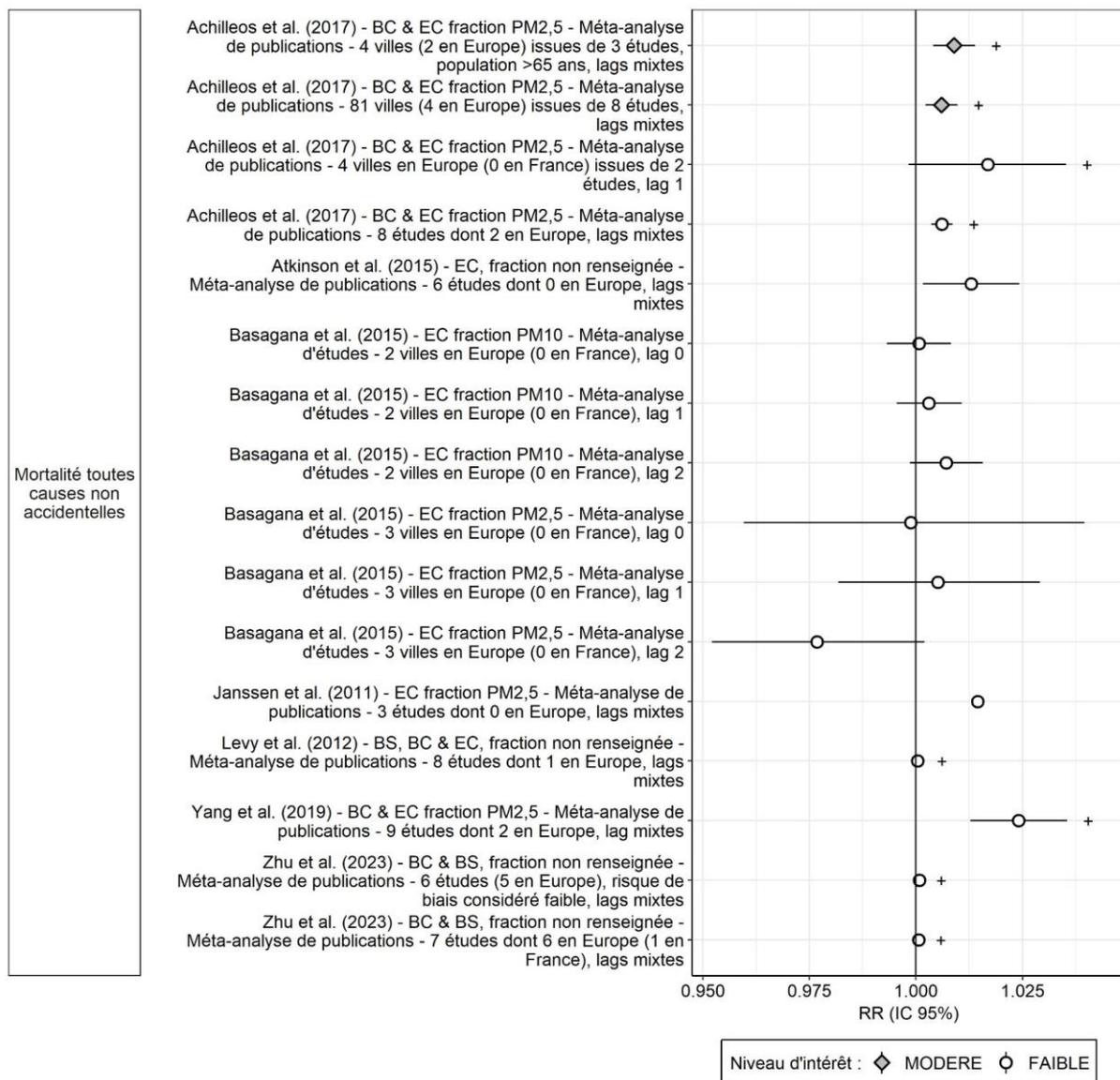
*BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire. I<sup>2</sup> est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.*

Au sein de ces 7 publications, 20 fonctions concentration-risque ont été extraites ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 4. Les fonctions issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 19. Les estimations centrales de risque issues de ces analyses sont presque toutes supérieures à 1. La moitié des associations atteignent la significativité statistique.

Parmi les 20 fonctions concentration-risque examinant la mortalité toutes causes cardiovasculaires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie », le GT en a identifié deux présentant un niveau d'intérêt « modéré » pour dériver une VTR (Figure 19). Elles sont issues de méta-analyses menées par Achilleos *et al.* (2017) et se différencient par la population d'étude. La première considère la population générale sans restriction d'âge et inclut les résultats de 81 villes dont 4 en Europe. La seconde considère la population âgée de plus de 65 ans et inclut les résultats de 4 villes dont 2 en Europe. L'analyse de Achilleos *et al.* (2017) est considérée de qualité modérée selon le GT et selon l'outil Moose.

Les autres fonctions concentration-risque présentent un niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR, en raison de l'absence de mise en évidence d'une association statistique significative (Basagaña *et al.* 2015; Levy *et al.* 2012), l'absence de localisations européennes (Atkinson *et al.* 2015; Janssen *et al.* 2011), l'inclusion de données anciennes utilisant une méthode de mesure obsolète de la fin des années 1960 (Zhu *et al.* 2023) ou le manque général d'informations dans la publication limitant l'interprétation et l'appréciation des résultats (Yang *et al.* 2019).

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à court terme au « carbone suie » et la mortalité toutes causes non accidentelles, le GT a identifié deux fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR ; elles sont issues de Achilleos *et al.* (2017) et sont retenues pour la suite de la démarche. Elles se différencient par la population d'étude : population générale (tous âges) et population âgée (>65 ans).**



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. + Mélange de métriques. BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 19. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de la mortalité toutes causes non accidentelles pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie »**

L'approche dite « simple » avec une application décrémente a été utilisée pour calculer les excès de risque journalier (EDR) de l'ensemble des événements de santé. C'est la seule approche préconisée dans le guide de l'Anses pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions à court terme.

Les EDR issus des deux fonctions concentration-risque de Achilleos *et al.* (2017) présentent l'avantage d'inclure des localisations, parfois nombreuses et en Europe, permettant la bonne transposabilité à la population française. La majorité des études incluses dans les méta-analyses considère la métrique EC pour représenter le « carbone suie » des particules de l'air ambiant, facilitant l'interprétation des résultats. De même, les lags 0 ou 1 sont examinés dans la plupart des études princeps. Enfin, l'analyse de Achilleos *et al.* (2017) est considérée de bonne qualité par le GT et de qualité modérée selon l'outil Moose.

Les EDR issus des fonctions concentration-risque de Achilleos *et al.* (2017) ont tous deux été sélectionnés pour la dérivation de VTR candidates pour les événements de santé : mortalité toutes causes non accidentelles et mortalité toutes causes non accidentelles chez les plus de 65 ans. Les EDR et leurs intervalles de confiance à 95 % sont représentés en Figures 20 et 21.

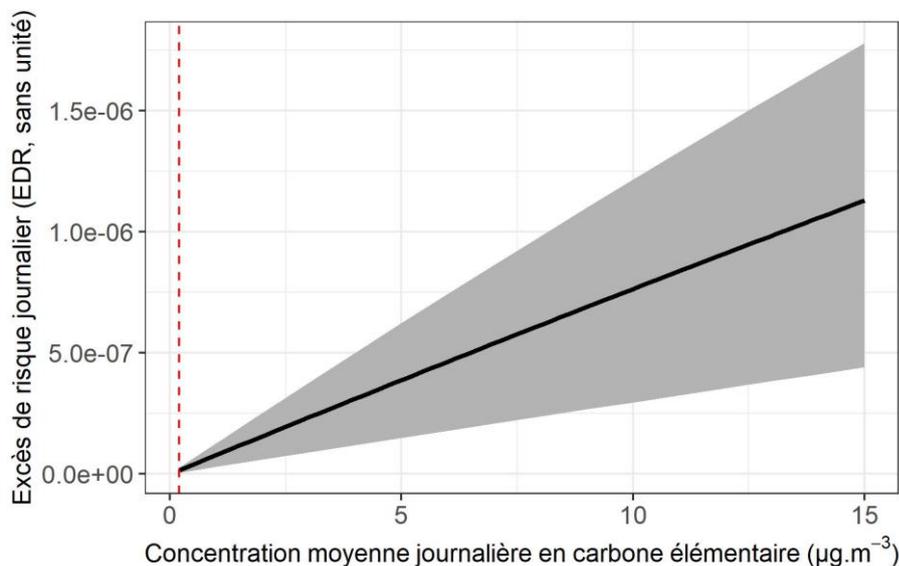


Figure 20. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes non accidentelles en fonction concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Achilleos *et al.* (2017)

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

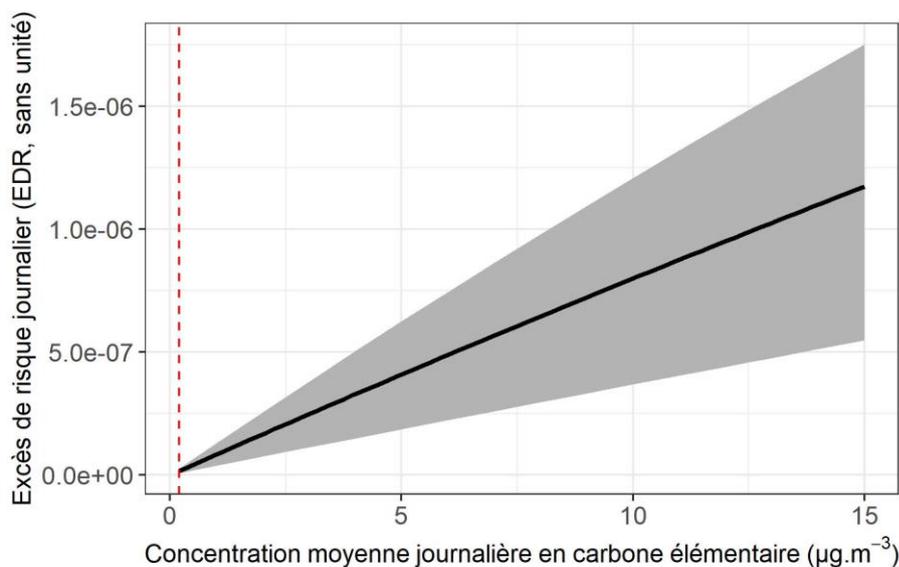


Figure 21. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes non accidentelles chez les plus de 65 ans en fonction des concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Achilleos *et al.* (2017)

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

**Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes non accidentelles**

Une seule publication, décrite de manière synthétique dans le Tableau 20, a examiné le lien entre l'exposition à court terme au « carbone suie » et les hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes non accidentelles (Yang *et al.* 2019).

**Tableau 20. Description synthétique de la publication identifiée pour les hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes non accidentelles en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes non accidentelles	(Yang <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de publications Méta-analyse de 3 publications (2 aux Etats-Unis et 1 en Chine) identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité faible ( $I^2=8\%$ ) entre les études incluses dans la méta-analyse. Métriques étudiées : BC et EC dans la fraction $PM_{2.5}$ . Différents lags investigués (lag 0 ou 1). Les événements de santé considérés sont hétérogènes entre les études : hospitalisations et/ou admissions hospitalières. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 18/34).

*BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.*

Une seule fonction concentration-risque a été extraite de cette publication, la valeur de l'estimation du risque est de 1,005 et l'association est à la limite de la significativité statistique. Le GT a déterminé cette fonction comme de niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR en raison de l'hétérogénéité des métriques étudiées limitant l'interprétation des résultats, de l'hétérogénéité des données de santé dans les études incluses dans les méta-analyses et de la qualité faible de l'étude.

**Par conséquent, le GT n'a pas dérivé de valeur candidate à la VTR pour l'évènement de santé : hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes non accidentelles car la fonction concentration-risque identifiée n'est pas d'intérêt suffisant.**

**Mortalité toutes causes cardiovasculaires**

La mortalité toutes causes cardiovasculaires était examinée dans sept publications en lien avec une exposition à court terme au « carbone suie ». Une description synthétique de ces publications est visible dans le Tableau 21.

**Tableau 21. Description synthétique (par ordre alphabétique) des sept publications identifiées pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 7 études dont 2 en Europe. Association positive et statistiquement significative. Hétérogénéité nulle entre les études. Une analyse secondaire par villes (8 villes dont 3 en Europe) montre des résultats similaires. Les études incluses examinent majoritairement l'EC (5 études sur EC, 2 études sur BC) et différents lags (0, 0-1, 0-3 ou 0-6). Qualité de la méta-analyse modérée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 28/34).
	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 5 études dont 0 en Europe. Hétérogénéité très élevée ( $I^2=97\%$ ) entre les études. Les études incluses examinent probablement différents lags, les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ce point. Métrique étudiée : EC (sans information sur la fraction d'intérêt). Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34).
	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	Méta-analyse d'études Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Hétérogénéité ( $I^2$ ) non renseignée. Carbone élémentaire dans les fractions $PM_{10}$ et $PM_{2.5}$ considéré. Plusieurs lags examinés pour chaque métrique, de 0 à 2. Ajustement sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Sur l'ensemble des analyses réalisées, une seule rapporte une association statistiquement significative. Qualité de la méta-analyse forte selon outil WHO ROB avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine.
	Janssen <i>et al.</i> (2011)	Méta-analyse de publications Méta-analyse de 3 études (2 aux Etats-Unis et 1 au Chili). Hétérogénéité ( $I^2$ ) entre les études non renseignée. Métrique étudiée : EC dans la fraction $PM_{2.5}$ . Les études incluses examinent différents lags (0-1, 1 ou 3). Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34).
	Song <i>et al.</i> (2022)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 14 études dont 3 en Europe, identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité modérée ( $I^2=30\%$ ) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (8 études sur EC, 5 études sur BC et 1 étude mixte) ainsi que différents lags. Association positive et statistiquement significative. Incertitudes quant à la définition des événements de santé dans les études princeps ; les auteurs utilisent la formulation « mortalité pour maladies cardiovasculaires », sans définition précise. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34).
	Yang <i>et al.</i> (2019)	Méta-analyse de publications 11 études incluses dans la méta-analyse (dont 2 en Europe), identifiées par une revue de la littérature. Ces études examinent différentes métriques (6 études sur EC, 2 études sur BC) ainsi que différents lags. Hétérogénéité modérée ( $I^2=40\%$ ). Association positive et statistique significative, qui persiste en analyse de sensibilité (i.e. incluant les études ajustant ou non sur les $PM_{2.5}$ totaux). Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34).
	Zhu <i>et al.</i> (2023)	Méta-analyse de publications Méta-analyse de 8 études dont 7 études en Europe (une en France), identifiées par une revue de la littérature. Faible hétérogénéité ( $I^2=38\%$ ) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (7 études sur BS et 1 étude sur BC) ; les auteurs ont exclu de leur sélection les études examinant EC. Différents lags sont combinés dans la méta-analyse, sans précision des auteurs sur ce point. Les résultats sont similaires dans l'analyse de sensibilité n'incluant que les études avec un faible risque de biais ( $I^2=44\%$ ). Pour chacune des analyses statistiques, une estimation de l'intervalle de confiance et de l'intervalle de prédiction a été réalisée. Qualité de la méta-analyse élevée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 32/34).

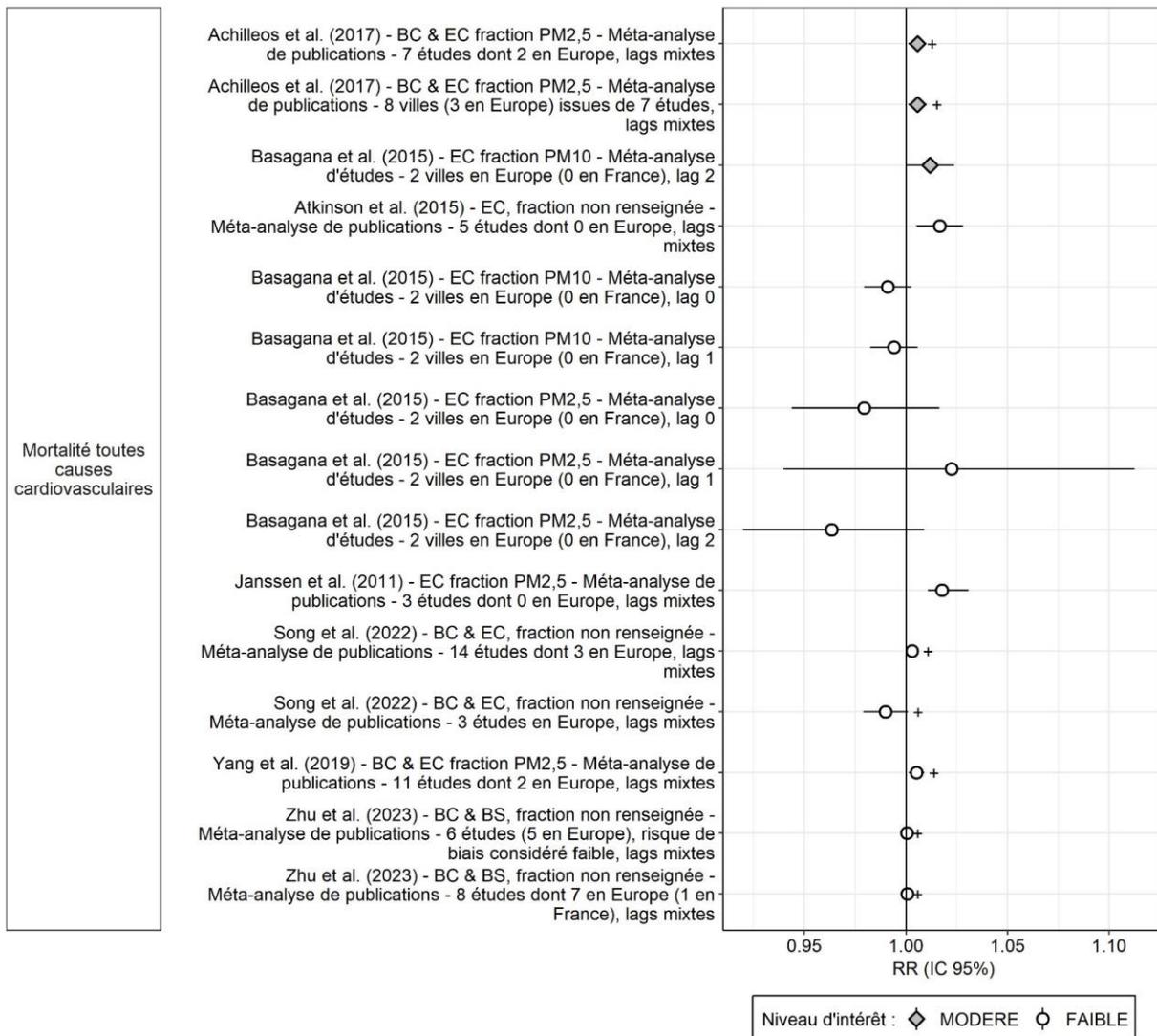
*BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire. I<sup>2</sup> est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.*

Au sein de ces sept publications, 19 fonctions concentration-risque ont été extraites. Les fonctions issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 22 ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 4. Les estimations centrales de risque issues des analyses principales se répartissent autour de 1, avec des valeurs comprises entre 0,963 et 1,022. Certaines associations ne sont pas statistiquement significatives.

Parmi les 19 fonctions concentration-risque examinant la mortalité toutes causes cardiovasculaires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie », le GT en a identifié 3 présentant un niveau d'intérêt « modéré » pour dériver une VTR (Figure 22). Elles sont issues de Achilleos *et al.* (2017) et Basagaña *et al.* (2015). Ces deux méta-analyses sont considérées de qualité modérée (selon l'outil Moose) et forte (selon l'outil WHO ROB), respectivement. Il est à noter que Basagaña *et al.* (2015) fait partie des publications incluses dans la méta-analyse de Achilleos *et al.* (2017).

Les autres fonctions concentration-risque présentent un niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR en raison de l'absence de mise en évidence d'une association (Basagaña *et al.* 2015), l'absence de localisations européennes (Atkinson *et al.* 2015 ; Janssen *et al.* 2011), l'inclusion de données anciennes utilisant une méthode de mesure obsolète de la fin des années 1960 (Zhu *et al.* 2023) et/ou un manque général d'informations dans la publication limitant l'interprétation et l'appréciation des résultats (Song *et al.* 2022 ; Yang *et al.* 2019).

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à court terme au « carbone suie » et la mortalité toutes causes cardiovasculaires, le GT a identifié 3 fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR ; ces fonctions sont retenues pour la suite de la démarche. Elles sont issues de 2 publications (Basagaña *et al.* 2015 ; Achilleos *et al.* 2017).**



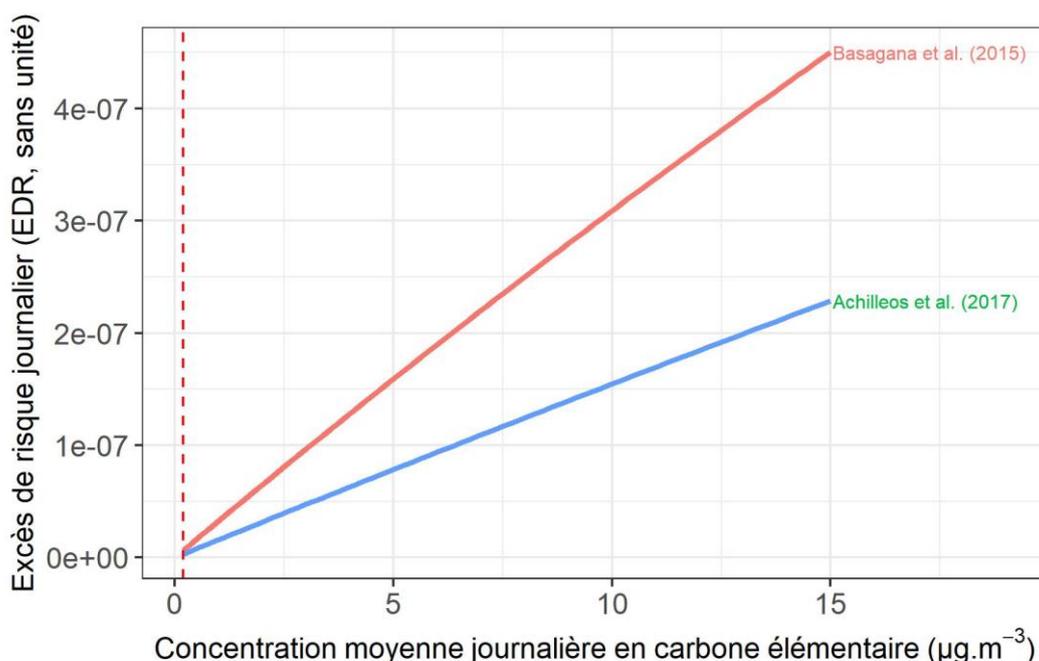
Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. + Mélange de métriques. BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 22. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de la mortalité toutes causes cardiovasculaires pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie »**

L'approche dite « simple » avec une application décrémente a été utilisée pour calculer les excès de risque journalier (EDR). C'est la seule approche préconisée dans le guide de l'Anses pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions à court terme.

Les valeurs des EDR pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires, obtenues à partir des trois fonctions concentration-risque retenues précédemment, sont visibles dans la Figure 23. Les deux fonctions concentration-risque de Achilleos *et al.* présentent les mêmes estimations centrales donc les EDR correspondants se chevauchent sur la figure.

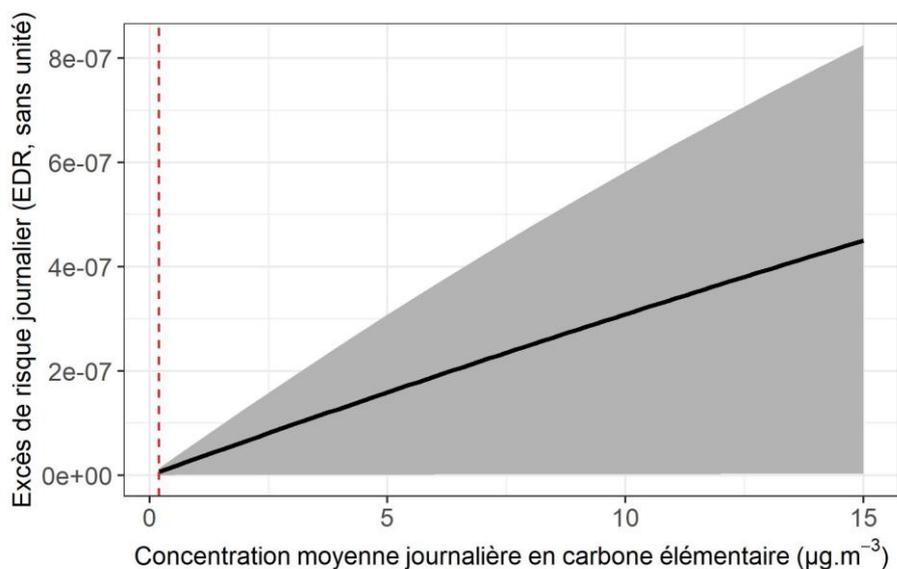
L'EDR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) est le plus protecteur sur la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. Cette méta-analyse d'études présente également l'avantage de n'inclure que des localisations européennes (permettant une bonne transposabilité à la population française) et de ne pas mélanger de métriques, ni de lags (améliorant l'interprétation de la valeur). L'analyse de Basagaña *et al.* est considérée de bonne qualité par le GT et selon l'outil WHO RoB.



Les deux fonctions concentration-risque de Achilleos et al. présentent les mêmes estimations centrales donc les EDR correspondants se chevauchent sur la figure. Les fonctions supposent une relation log-linéaire.

**Figure 23. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale) de décès toutes causes cardiovasculaires en fonction des concentrations journalières en « carbone suie » (exprimées en carbone élémentaire)**

Compte tenu de ces éléments, l'EDR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Basagaña et al. (2015) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité toutes causes cardiovasculaires. L'EDR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 24.



**Figure 24. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes cardiovasculaires en fonction des concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Basagaña et al. (2015)**

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

### **Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive**

Une seule publication, décrite de manière synthétique dans le Tableau 22, a examiné le lien entre l'exposition à court terme au « carbone suie » et les hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive (Song *et al.* 2022).

**Tableau 22. Description synthétique de la publication identifiée pour les hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive	Song <i>et al.</i> (2022)	Méta-analyse de publications Nombre de publications incluses : 3 publications (aucune de localisation européenne) identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité élevée ( $I^2=64,7\%$ ) entre les études. Métriques étudiées : BC et EC, pas d'indication de la fraction. Différents lags ont été investigués mais sans précision. Les événements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34).

*BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard*

Une seule fonction concentration-risque a été extraite de cette publication, la valeur de l'estimation du risque est de 1,076 et l'association est statistiquement significative. Le GT a néanmoins déterminé cette fonction comme de niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR en raison de l'hétérogénéité des métriques étudiées limitant l'interprétation des résultats, de l'hétérogénéité de la définition des données de santé et de la qualité faible de l'étude.

**Par conséquent, le GT n'a pas dérivé de valeur candidate à la VTR pour l'évènement de santé : hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive car la fonction concentration-risque identifiée n'est pas d'intérêt suffisant.**

**Mortalité toutes causes respiratoires**

La mortalité toutes causes respiratoires était examinée dans six publications en lien avec une exposition à court terme au « carbone suie ». Une description synthétique de ces publications est visible dans le Tableau 23.

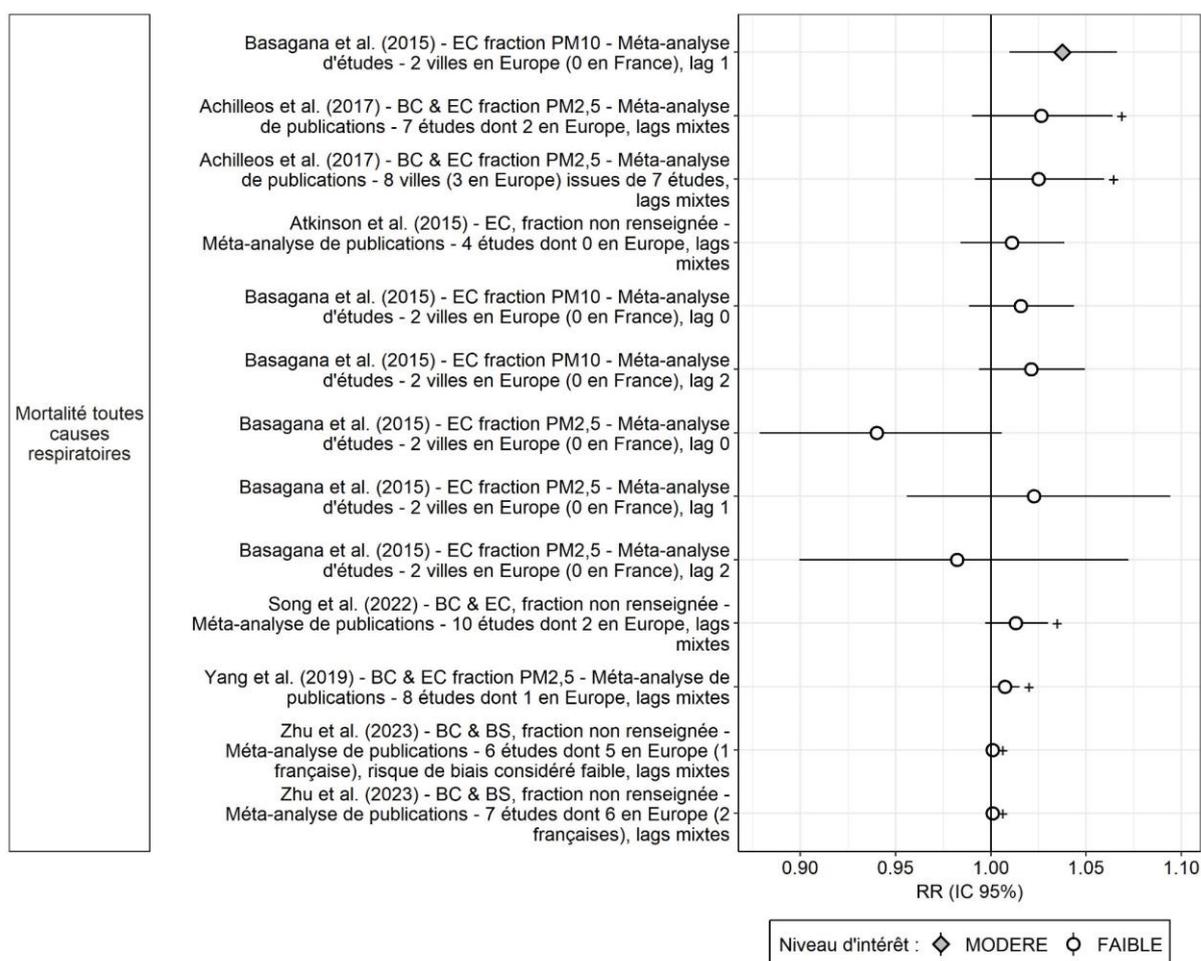
**Tableau 23. Description synthétique (par ordre alphabétique) des six publications identifiées pour la mortalité toutes causes respiratoires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Mortalité toutes causes respiratoires	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 7 études dont 2 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015). Association positive, à la limite de la significativité statistique. Hétérogénéité élevée entre les études ( $I^2=63\%$ ). Une analyse secondaire par villes (8 villes dont 3 en Europe) montre des résultats similaires. Les études incluses examinent majoritairement l'EC (5 études sur EC, 2 études sur BC) et différents lags (0, 0-1, 0-3 ou 0-6). Qualité de la méta-analyse modérée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 28/34).
	Atkinson <i>et al.</i> (2015)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 4 études dont 0 en Europe. Hétérogénéité très élevée ( $I^2=99\%$ ) entre les études. Les études incluses examinent probablement différents lags, les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ce point. Métrique étudiée : EC (sans information sur la fraction d'intérêt). Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 17/34).
	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	Méta-analyse d'études Méta-analyse d'études dans 2 villes en Espagne et en Italie. Hétérogénéité ( $I^2$ ) non renseignée. Carbone élémentaire dans les fractions $PM_{10}$ et $PM_{2,5}$ considéré. Plusieurs lags examinés pour chaque métrique, de 0 à 2. Ajustement sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Qualité de la méta-analyse forte selon outil WHO ROB avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine.
	Song <i>et al.</i> (2022)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 10 études dont 2 en Europe (incluant Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité élevée ( $I^2=66\%$ ) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (6 études sur EC, 3 études sur BC et 1 étude mixte) ainsi que différents lags. Association positive et statistiquement significative. Incertitudes quant à la définition des événements de santé dans les études princeps ; les auteurs utilisent la formulation « mortalité pour maladies respiratoires », sans définition précise. Qualité de la méta-analyse faible selon outil Moose (score : 24/34).
	Yang <i>et al.</i> (2019)	Méta-analyse de publications Méta-analyse incluant 8 études dont 1 en Europe (Basagaña <i>et al.</i> 2015), identifiées par une revue de la littérature. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques ainsi que différents lags. Hétérogénéité faible ( $I^2=11,3\%$ ) entre les études incluses dans la méta-analyse. Association positive et presque statistiquement significative, qui persiste en analyse de sensibilité (i.e. incluant les études ajustant ou non sur les $PM_{2,5}$ totaux). Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34).
	Zhu <i>et al.</i> (2023)	Méta-analyse de publications Méta-analyse de 7 études dont 6 en Europe (2 en France). Faible hétérogénéité ( $I^2=32\%$ ) entre les études. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (6 études sur BS, 1 étude sur BC) et les auteurs ont exclu de leur sélection les études examinant EC. Différents lags sont combinés dans la méta-analyse, sans précision des auteurs sur ce point. Les résultats sont similaires en analyse de sensibilité n'incluant que les études avec un faible risque de biais. Pour chacune des analyses statistiques, une estimation de l'intervalle de confiance et de l'intervalle de prédiction a été réalisée. Qualité de la méta-analyse élevée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 32/34).

BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard

Au sein de ces six publications, 18 fonctions concentration-risque ont été extraites ; la liste complète de ces fonctions est visible en Annexe 4. Celles issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 25. Les estimations centrales de risque issues des analyses principales se répartissent autour de 1, avec des

valeurs comprises entre 0,940 et 1,043. La grande majorité des associations n'atteint pas la significativité statistique (Figure 25).



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. + Mélange de métriques. BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 25. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de la mortalité toutes causes respiratoires pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie »**

Parmi les 18 fonctions concentration-risque examinant la mortalité toutes causes respiratoires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie », le GT en a identifié une présentant un niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR. Elle est issue de Basagaña *et al.* (2015). Cette méta-analyse d'étude est la seule à rapporter une association statistiquement significative. Elle est considérée de bonne qualité selon le GT et selon l'outil WHO ROB.

Les autres fonctions concentration-risque présentent un niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR, notamment en raison de l'absence de mise en évidence d'une association.

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à court terme au « carbone suie » et la mortalité toutes causes respiratoires, le GT a identifié 1 fonction concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR ; cette fonction issue de Basagaña *et al.* (2015) est retenue pour la suite de la démarche.**

L'approche dite « simple » avec une application décrémente a été utilisée pour calculer les excès de risque journalier (EDR) de l'ensemble des événements de santé. C'est la seule approche préconisée dans le guide de l'Anses pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions à court terme.

L'EDR issu de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) présente l'avantage de concerner des populations européennes uniquement (permettant la bonne transposabilité à la population française) et de ne pas mélanger de métriques, ni de *lags* (améliorant l'interprétation de la valeur). L'analyse de Basagaña *et al.* est considérée de bonne qualité par le GT et selon l'outil WHO ROB.

**L'EDR issu de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) a donc été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité toutes causes respiratoires. L'EDR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 26.**

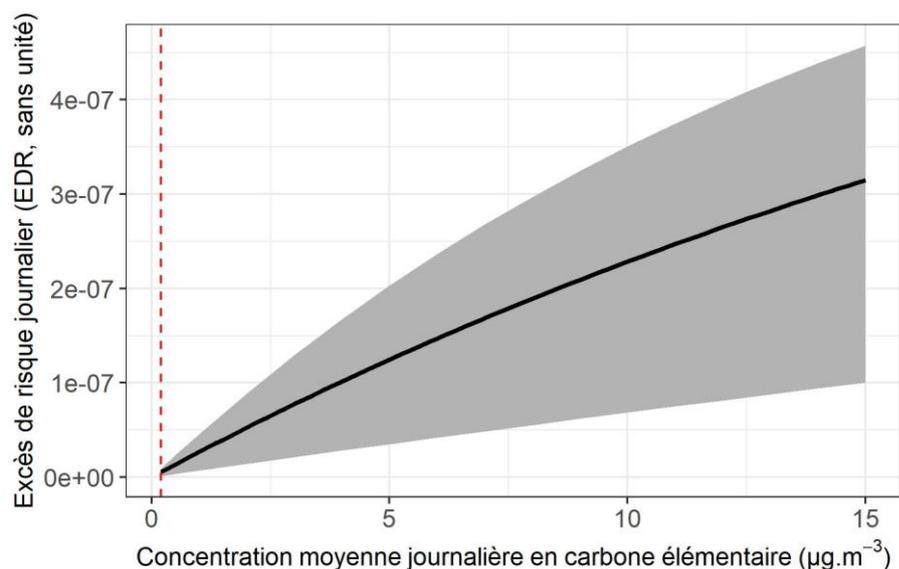


Figure 26. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) de décès toutes causes respiratoires en fonction des concentrations journalières en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015)

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

**Hospitalisations toutes causes respiratoires**

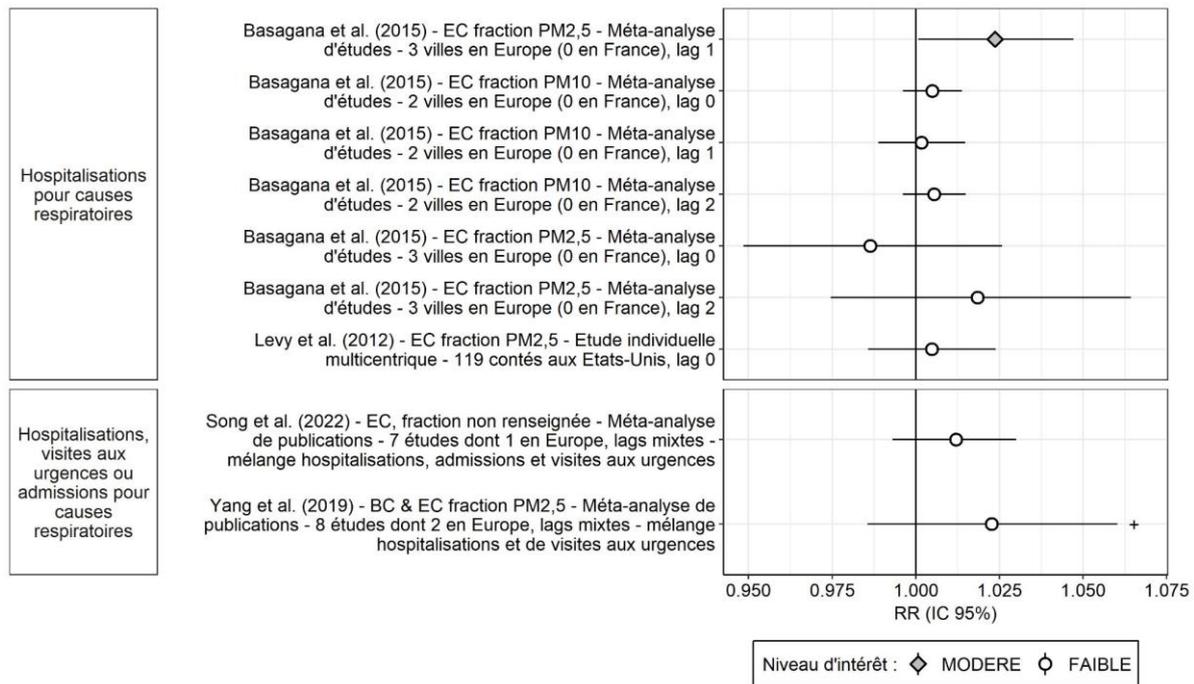
Les hospitalisations toutes causes respiratoires en lien avec une exposition à court terme au « carbone suie » étaient examinées dans deux publications (Basagaña *et al.* 2015; Levy *et al.* 2012). Deux autres publications (Song *et al.* 2022; Yang *et al.* 2019) ont considéré différentes définitions de l'évènement de santé incluant les hospitalisations, les visites aux urgences ou les admissions pour causes respiratoires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie ». Une description synthétique de ces quatre publications est visible dans le Tableau 24.

**Tableau 24. Description synthétique (par ordre alphabétique) des quatre publications identifiées pour les hospitalisations toutes causes respiratoires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Hospitalisations toutes causes respiratoires	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	Méta-analyse d'études Méta-analyse d'études dans 2 ou 3 villes en Espagne et en Italie. Hétérogénéité ( $I^2$ ) non renseignée. Métrique étudiée : EC dans les fractions PM <sub>10</sub> et PM <sub>2,5</sub> considéré. Plusieurs lags examinés pour chaque métrique, de 0 à 2. Ajustement sur l'ensemble des facteurs de confusion critiques et additionnels. Qualité de la méta-analyse forte selon outil WHO ROB avec des risques de biais jugés faible ou modéré pour chaque domaine.
	Levy <i>et al.</i> (2012)	Analyse multi-villes poolée Etude individuelle multicentrique dans 119 comtés des Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2,5</sub> . Seul le lag 0 a été examiné. Qualité de l'étude modérée selon outil WHO RoB, avec un risque de biais de confusion jugé élevé en raison de la non prise en compte de la saison. Les résultats des analyses stratifiées sur la localisation (Est et Ouest des Etats-Unis) confirment les résultats des analyses principales.
	Song <i>et al.</i> (2022)	Méta-analyse de publications Nombre de publications incluses : 7 publications (dont 1 en Europe), identifiées par une revue de la littérature. Hétérogénéité élevée ( $I^2=91,8\%$ ) entre les études. Métrique étudiée : EC, pas d'indication de la fraction. Différents lags ont été investigués mais sans précision. Les évènements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 24/34).
	Yang <i>et al.</i> (2019)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 8 études (dont 2 en Europe), identifiées par une revue de la littérature. Les études incluses dans la méta-analyse examinent différentes métriques (6 études sur EC, 2 études sur BC) ainsi que différents lags. Les évènements de santé considérés sont hétérogènes entre les études : hospitalisations et visites aux urgences. Hétérogénéité élevée ( $I^2=74\%$ ) entre les études incluses dans la méta-analyse. Qualité de la méta-analyse faible selon l'outil Moose (score : 18/34).

BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.

Au sein des quatre publications, 13 fonctions concentration-risque ont été extraites. Les fonctions issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 27. Les estimations centrales de risque issues des analyses principales sont majoritairement supérieures à 1, avec des valeurs comprises entre 0,985 et 1,026, bien qu'une seule association issue de la publication de Basagaña *et al.* (2015) soit statistiquement significative.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. + Mélange de métriques. BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 27. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'hospitalisations toutes causes respiratoires pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie ».**

Parmi les 13 fonctions concentration-risque examinant les hospitalisations toutes causes respiratoires en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie », le GT a identifié une seule fonction présentant un intérêt « modéré » pour dériver une VTR qui est issue de la publication de Basagaña *et al.* (2015). Cette publication est une méta-analyse d'études évaluée comme de qualité forte selon l'outil WHO RoB. Celle-ci n'inclut que des études réalisées en Europe mais seulement dans 3 villes (en Espagne et en Italie) et rapporte une seule association statistiquement significative (EC dans la fraction  $\text{PM}_{2,5}$  sur le lag 1).

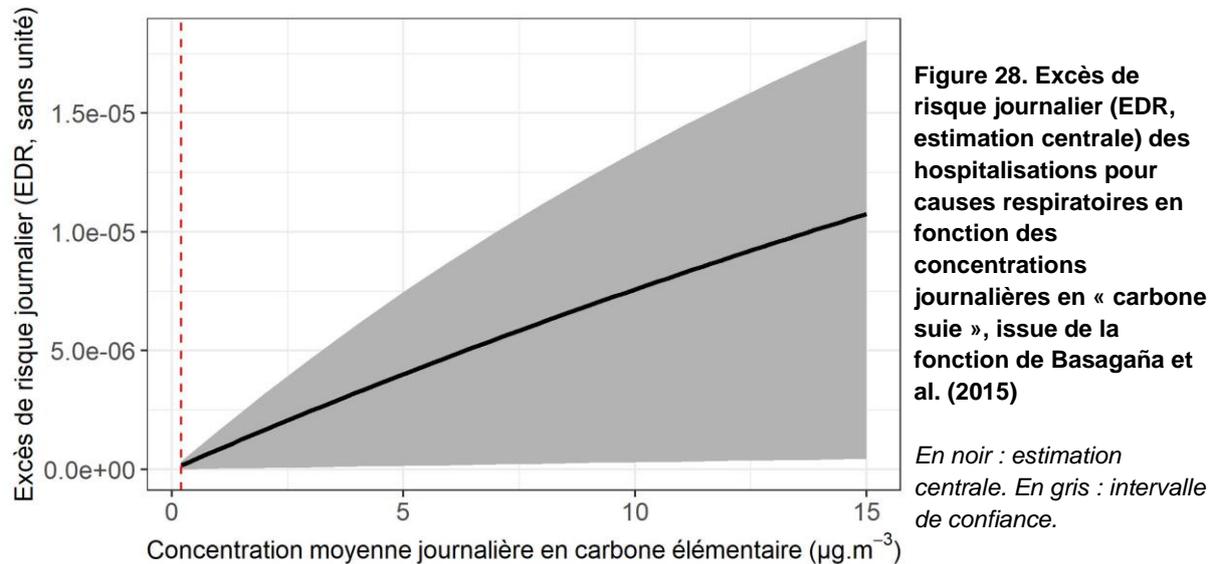
Les autres fonctions de Basagaña *et al.* (2015) ainsi que celles rapportées par Song *et al.* (2022), Yang *et al.* (2019) et Levy *et al.* (2012) présentent un niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR en raison de l'absence de mise en évidence d'une association statistiquement significative (Basagaña *et al.* 2015 ; Levy *et al.* 2012), du mélange de métriques limitant l'interprétation des résultats (Song *et al.* 2022 ; Yang *et al.* 2019) et de l'hétérogénéité de la définition des données de santé considérées (Song *et al.* 2022 ; Yang *et al.* 2019).

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à court terme au « carbone suie » et les hospitalisations toutes causes respiratoires, le GT a identifié une seule fonction concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR ; cette fonction est retenue pour la suite de la démarche. Elle est issue de la publication de Basagaña *et al.* (2015).**

L'approche dite « simple » avec une application décrémente a été utilisée pour calculer les excès de risque journalier (EDR) de l'ensemble des événements de santé. C'est la seule approche préconisée dans le guide de l'Anses pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions à court terme.

L'analyse de Basagaña *et al.* (2015) est considérée de bonne qualité par le GT compte tenu des faibles risques de biais, de la définition précise du nombre de jours de décalage entre exposition et évènement de santé, de l'inclusion d'études de localisation européenne uniquement, ainsi que de l'homogénéité de la métrique étudiée (EC).

**Compte tenu de ces éléments, l'EDR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Basagaña *et al.* (2015) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : hospitalisations toutes causes respiratoires. L'EDR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 28.**



### Visites aux urgences pour asthme

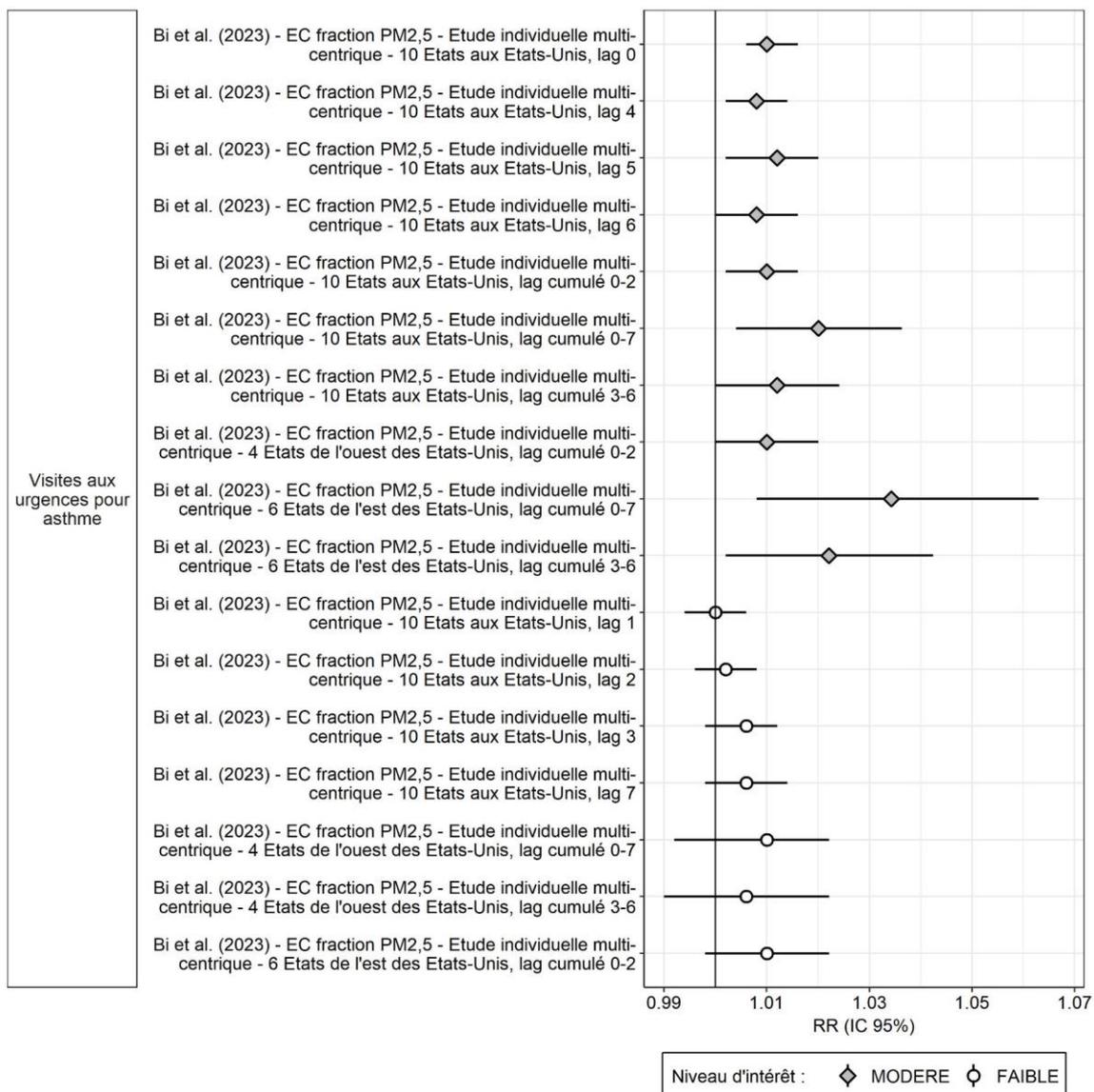
Une publication a examiné le lien entre l'exposition à court terme au « carbone suie » et les visites aux urgences pour asthme (Bi *et al.* 2023). Une autre publication a considéré différentes définitions de l'évènement de santé incluant les hospitalisations, les visites aux urgences ou les admissions pour asthme en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie » (Song *et al.* 2022). Ces deux publications sont décrites de manière synthétique dans le Tableau 25.

**Tableau 25. Description synthétique (par ordre alphabétique) des deux publications identifiées pour les visites aux urgences pour asthme en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Visites aux urgences pour asthme	(Bi <i>et al.</i> 2023)	Etude multicentrique Etude individuelle multicentrique incluant 10 états aux Etats-Unis. Métrique étudiée : EC dans la fraction PM <sub>2.5</sub> . Plusieurs lags individuels ont été considérés (lags 0 à 7) ainsi que des lags cumulés (0-2, 3-6 et 0-7). Evènement de santé étudié : visites aux urgences pour asthme. Qualité de l'étude élevée selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB avec des risques de biais jugés faibles. Des analyses stratifiées sur la localisation des états (6 états dans l'Est et 4 états dans l'Ouest des Etats-Unis) ont été réalisées. Des analyses stratifiées sur l'âge ont également été réalisées : chez l'enfant (1-4 ans et 5-17 ans) et chez l'adulte (18-49 ans, 50-64 ans et ≥65 ans).
	Song <i>et al.</i> (2022)	Méta-analyse de publications Deux méta-analyses ont été réalisées suite à une revue de la littérature : une méta-analyse incluant 5 publications examinant des populations d'enfants (0-18 ans) et une méta-analyse incluant 4 publications examinant des populations d'adultes (>18 ans). Aucune localisation européenne recensée. Hétérogénéité nulle (I <sup>2</sup> =0 %) entre les études dans les deux méta-analyses. Métriques étudiées : BC et EC, pas d'indication sur la fraction. Différents lags investigués dans les études mais sans précision. Les évènements de santé considérés dans les études sont définis de manière hétérogène (hospitalisations, admissions et visites aux urgences) et les auteurs ne donnent pas d'informations détaillées sur ces définitions. Qualité de la méta-analyse faible selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 24/34).

BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire. I<sup>2</sup> est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard

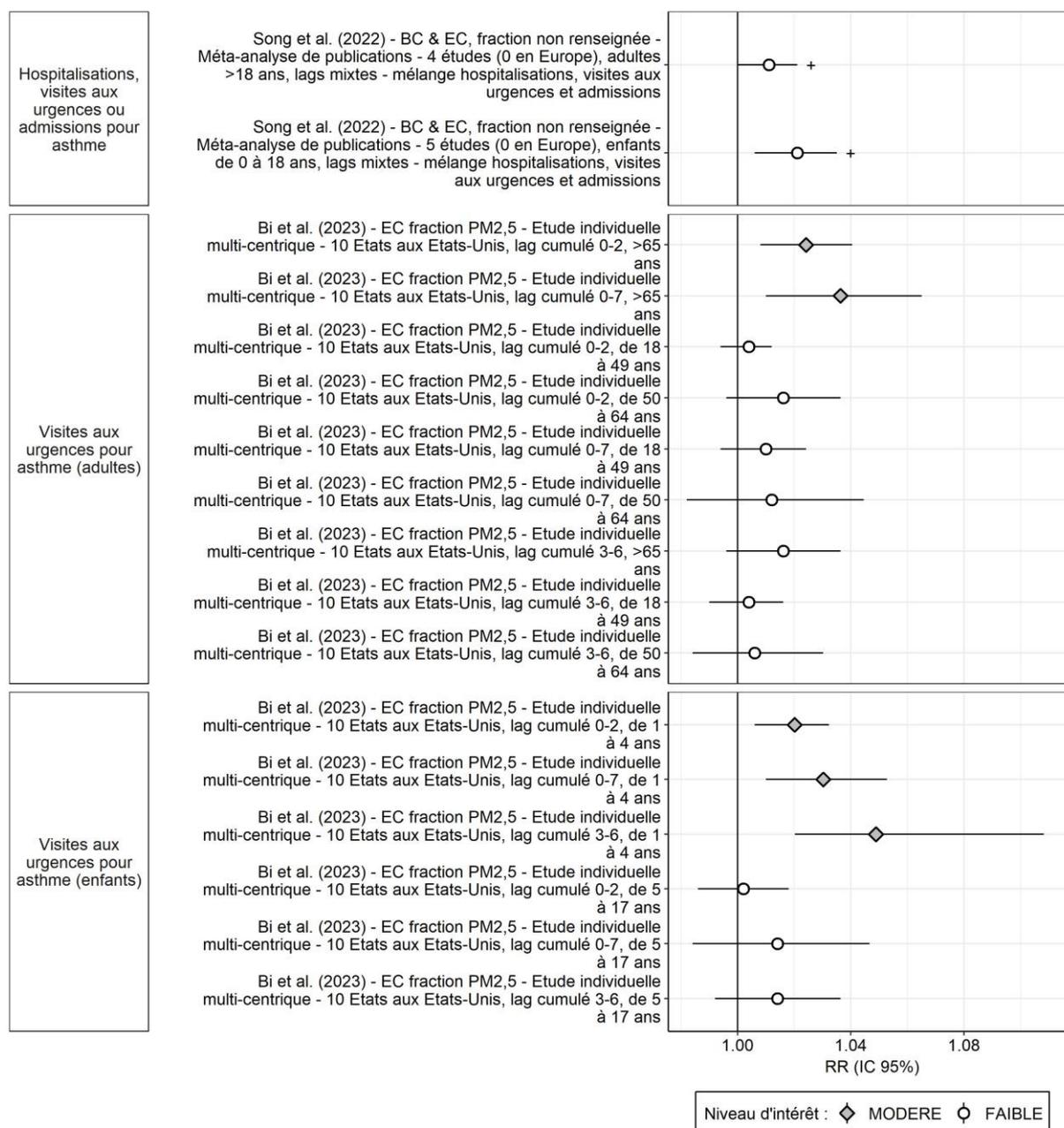
Au sein de ces deux publications, 34 fonctions concentration-risque ont été extraites dont 17 fonctions sur l'évènement visites aux urgences pour asthme chez l'ensemble des populations d'étude (tous âges), 7 fonctions sur l'évènement visites aux urgences pour asthme ou l'évènement mélangeant hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour asthme chez les populations d'enfant et 10 fonctions chez les populations d'adulte. Les fonctions issues des résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans les Figures 29 et 30. Les estimations centrales de risque issues des analyses principales sont toutes supérieures à 1, avec des valeurs comprises entre 1,000 et 1,021, bien que certaines associations issues de la publication de Bi *et al.* ne soient pas statistiquement significatives.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. + Mélange de métriques. EC : carbone élémentaire.

**Figure 29. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % des visites aux urgences pour asthme (tous âges) pour une augmentation de  $1 \mu\text{g.m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie ».**

Parmi les 34 fonctions concentration-risque examinant les visites aux urgences pour asthme en lien avec l'exposition à court terme au « carbone suie », le GT a identifié 15 fonctions présentant un intérêt « modéré » pour dériver une VTR, toutes issues de la publication de Bi et al. (2023). Cette publication est une étude individuelle multicentrique incluant 10 états aux Etats-Unis, évaluée comme de qualité élevée selon l'évaluation avec l'outil WHO RoB. Les analyses stratifiées sur la localisation des états (états dans l'Est et états dans l'Ouest des Etats-Unis) et celles stratifiées sur l'âge (différentes classes d'âges enfant et adulte) montrent des résultats similaires aux analyses principales.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. + Mélange de métriques. BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 30. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % des visites aux urgences pour asthme chez l'enfant et chez l'adulte pour une augmentation de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  de l'exposition à court terme au « carbone suie »**

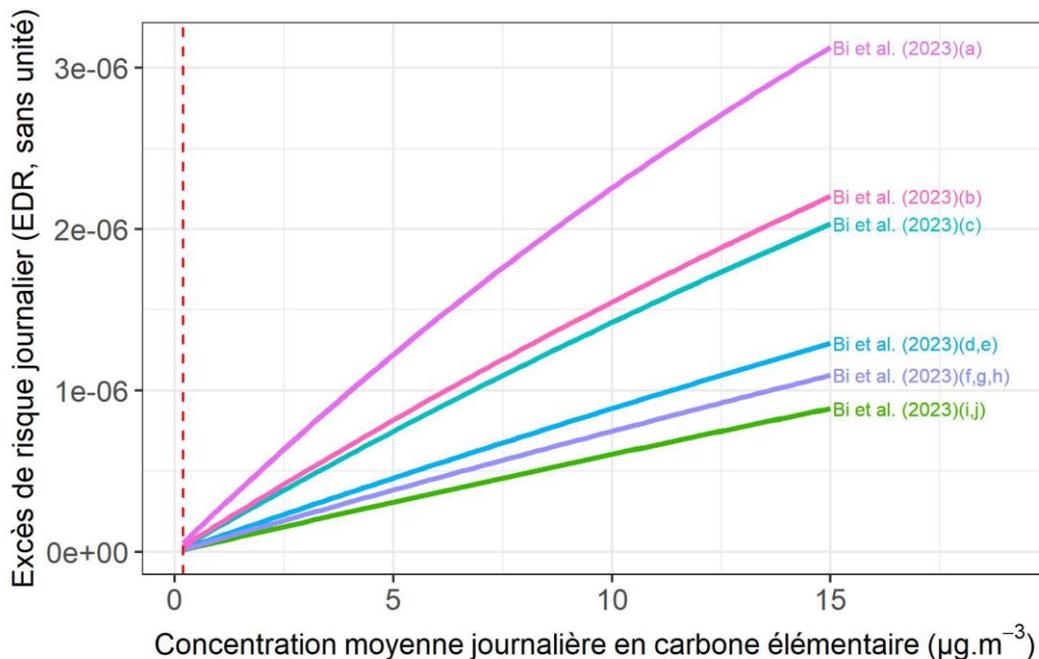
Les 10 fonctions examinant la population générale (tout âge) (Figure 29) ont été privilégiées aux 5 fonctions stratifiées sur l'âge (Figure 30) pour la suite de la démarche car ces dernières sont considérées moins robustes. En effet, il existe probablement des erreurs de classification lors des passages aux urgences pour les âges extrêmes ; il est notamment difficile de dissocier l'asthme de la bronchiolite chez les jeunes enfants et l'asthme de la BPCO chez les personnes âgées. Pour les mêmes raisons, les données de fond nécessaires au calcul d'éventuelles valeurs candidates seraient incertaines. Enfin, les fonctions obtenues en population générale incluent bien les enfants et les personnes âgées et les valeurs des estimations centrales sont proches.

Les autres fonctions de Bi *et al.* (2023) ainsi que celles rapportées par Song *et al.* (2022) présentent un niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR en raison de l'absence de mise en évidence d'une association significative (Bi *et al.* 2023), du mélange de métriques limitant l'interprétation des résultats (Song *et al.* 2022), de la qualité faible de l'étude (Song *et al.* 2022) et de l'hétérogénéité de la définition des données de santé dans les méta-analyses (Song *et al.* 2022).

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à court terme au « carbone suie » et les visites aux urgences pour asthme (tous âges), le GT a identifié 10 fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR. Elles sont issues de la publication de Bi *et al.* (2023).**

L'approche dite « simple » avec une application décrémente a été utilisée pour calculer les excès de risque journalier (EDR) de l'ensemble des événements de santé. C'est la seule approche préconisée dans le guide de l'Anses pour dériver une VTR sans seuil et qui soit applicable à des expositions à court terme.

Les valeurs des EDR pour les visites aux urgences pour asthme, obtenues à partir des fonctions concentration-risque retenues précédemment, sont visibles dans la Figure 31. Parmi les 10 fonctions concentration-risque, quatre fonctions présentent les mêmes estimations centrales, les EDR correspondants se chevauchent sur la Figure 31.



Les fonctions supposent une relation log-linéaire. Quatre fonctions présentent les mêmes estimations centrales donc les EDR correspondants se chevauchent sur la figure : (a) 6 états de l'Est des Etats-Unis, lag cumulé 0-7 ; (b) 6 états de l'Est des Etats-Unis, lag cumulé 3-6 ; (c) 10 états aux Etats-Unis, lag cumulé 0-7 ; (d) 10 états aux Etats-Unis, lag cumulé 3-6 ; (e) 10 états aux Etats-Unis, lag 5 ; (f) 4 états de l'Ouest des Etats-Unis, lag cumulé 0-2 ; (g) 10 états aux Etats-Unis, lag cumulé 0-2 ; (h) 10 états aux Etats-Unis, lag 0 ; (i) 10 états aux Etats-Unis, lag 6 ; (j) 10 états aux Etats-Unis, lag 4.

**Figure 31. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale) des visites aux urgences pour asthme (tous âges) en fonction des concentrations journalières en « carbone suie » (exprimées en carbone élémentaire)**

L'EDR dérivé de l'utilisation de la fonction concentration de Bi *et al.* (2023) issue de l'analyse dans les 6 états de l'Est des Etats-Unis dans la population générale (tout âge) sur un lag cumulé de 0-7, est le plus protecteur sur la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. Bien que cette étude se base sur des données aux Etats-Unis uniquement,

l'analyse est considérée de bonne qualité par le GT compte tenu des faibles risques de biais, de la définition précise du nombre de jours de décalage entre exposition et évènement de santé et de l'homogénéité de la métrique étudiée (carbone élémentaire).

Compte tenu de ces éléments, l'EDR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de *Bi et al. (2023)* a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : visites aux urgences pour asthme. L'EDR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 32.

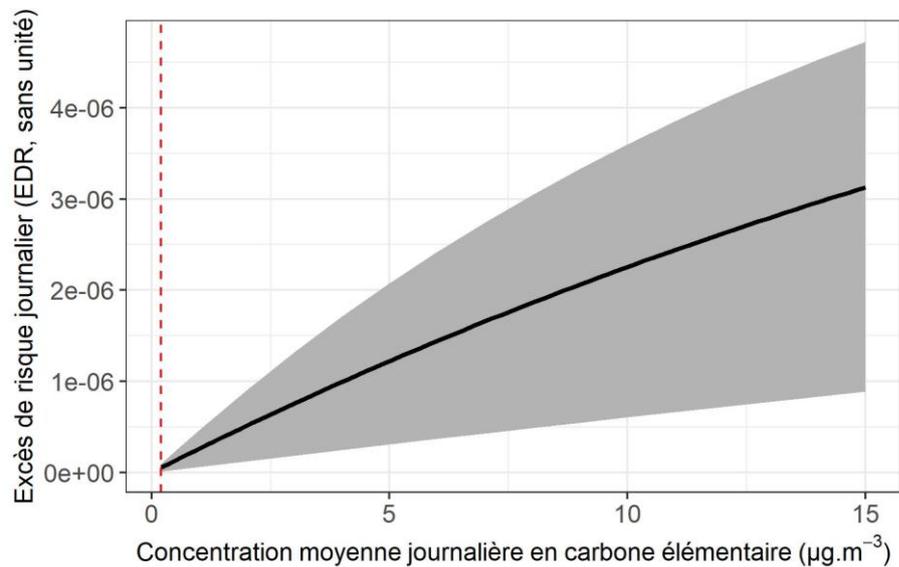


Figure 32. Excès de risque journalier (EDR, estimation centrale et intervalle de confiance) des visites aux urgences pour asthme en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issu de la fonction concentration-risque de *Bi et al. (2023)*

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

## Synthèse

Tableau 26. Description synthétique des données utilisées pour dériver les valeurs candidates à la VTR court terme pour le « carbone suie »

Evènement de santé	N références identifiées	N fonctions concentration-risque extraites	Référence de la fonction concentration-risque retenue pour la construction de l'EDR	Approche utilisée pour la construction de l'EDR	Source des données de santé (correspondant au risque de fond) utilisées pour la construction de l'EDR
<b>Mortalité toutes causes</b>					
Mortalité toutes causes non accidentelles	7	20	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	Simple décroissante	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
Mortalité toutes causes non accidentelles (>65 ans)	7	20	Achilleos <i>et al.</i> (2017)	Simple décroissante	Données CépiDC : Taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
<b>Hospitalisations toutes causes</b>					
Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour causes non accidentelles	1	1	Aucune fonction retenue car niveau d'intérêt insuffisant	s.o	s.o
<b>Santé cardiovasculaire</b>					
Hospitalisations pour causes cardiovasculaires	4	13	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	Simple décroissante	Données PMSI-MCO communiquées par Santé Publique France : taux moyen journalier d'hospitalisations (en excluant soins de suite et réadaptation) pour 100 000 habitants en France entière, 2017-2019
Hospitalisations, visites aux urgences ou admissions pour insuffisance cardiaque congestive	1	1	Aucune fonction retenue car niveau d'intérêt insuffisant	s.o	s.o
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	7	19	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	Simple décroissante	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
<b>Santé respiratoire</b>					
Hospitalisations pour causes respiratoires	4	13	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	Simple décroissante	Données PMSI-MCO communiquées par Santé Publique France : taux moyen journalier d'hospitalisations (en excluant soins de suite et réadaptation) pour 100 000 habitants en France entière, 2017-2019
Mortalité toutes causes respiratoires	6	18	Basagaña <i>et al.</i> (2015)	Simple décroissante	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015

Evènement de santé	N références identifiées	N fonctions concentration-risque extraites	Référence de la fonction concentration-risque retenue pour la construction de l'EDR	Approche utilisée pour la construction de l'EDR	Source des données de santé (correspondant au risque de fond) utilisées pour la construction de l'EDR
Visites aux urgences pour asthme (tous âges)	1	17	Bi <i>et al.</i> (2023)	Simple décroissante	Données du réseau Sursaud® communiquées par Santé Publique France : nombre et taux de passages journaliers aux urgences pour asthme par département (hors Martinique) et taux de codage des diagnostics médicaux dans les résumés de passages aux urgences pour les établissements de chaque département, 2017-2019
Visites aux urgences pour asthme (enfants)	2	10	Aucune fonction retenue car incertitudes sur la définition de l'évènement de santé aux âges les plus jeunes (<6 ans)	s.o	s.o
Visites aux urgences pour asthme (adultes)	2	7	Aucune fonction retenue car incertitudes sur la définition de l'évènement de santé aux âges avancés (chevauchement avec la BPCO)	s.o	s.o

BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive ; COM : collectivités d'Outre-mer ; EDR : excès de risque journalier (excess daily risk) ; s.o : sans objet.

## Annexe 6 : Niveaux de confiance dans les valeurs candidates à la VTR court terme pour le carbone suie

### Guide de remplissage

Catégorie	Critère	Guide de remplissage pour les études observationnelles chez l'Homme
Corpus de données	Quantité et qualité	Jugement d'experts : 1 à 5. Se reporter au chapitre 3.
Hypothèse de construction	Sans seuil	Absence de seuil à l'échelle de la population : 4 ou 5 (jugement d'experts).
Choix de l'effet critique	Nature des effets	Effet fonctionnel : 3 ou 4 (jugement d'experts ; plutôt 4 quand l'effet est globalement réversible – asthme par exemple) Lésions histopathologiques : 5
	Convergence des études	Jugement d'experts : 1 à 5. Se reporter aux figures dans le Chapitre 6 et l'Annexe 5. <i>De manière complémentaire, dans le cas du carbone suie, la convergence pourra être évaluée en considérant les études examinant les PM en masse pour un même événement de santé.</i>
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	Mécanisme inconnu : 3 Connaissance incomplète du mécanisme chez l'Homme : 4 Mécanisme connu chez l'Homme : 5 Jugement d'experts. Se reporter au Chapitre 3 si besoin
	Transposabilité animal - Homme	La transposabilité animal-Homme n'est pas une source d'incertitude dans les présents travaux : 5
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	Jugement d'experts : 1 à 5. Se reporter au Chapitre 6 et aux Annexes 4 et 5.
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	Se reporter à l'évaluation du niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque pour dériver une VTR : • Intérêt « modéré » : 3 • Intérêt « fort » : 5
Ajustements	Temporel	L'ajustement temporel n'est pas une source d'incertitude dans les présents travaux : 5
	Allométrique	L'ajustement allométrique n'est pas nécessaire dans les présents travaux : 5
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	Ce critère n'a pas été considéré pour évaluer la confiance dans les valeurs candidates à <u>court terme</u> car seule l'approche dite « simple » a été appliquée (cf. chapitre 5.5.2).

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.*

**Hospitalisations pour causes cardiovasculaires**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	5	Niveau de plausibilité du lien de causalité « fort » selon le GT
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Absence de seuil à l'échelle de la population
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Hospitalisations pour causes cardiovasculaires
	Convergence des études	4	Deux publications dont les fonctions vont dans le même sens (association positive) avec chevauchement des intervalles de confiance. Deux fonctions sont <1, non statistiquement significatives. Les deux publications incluant des événements de santé hétérogènes (hospitalisations et visites aux urgences) confortent les résultats positifs. Convergence à noter avec les études sur PM.
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	5	Selon ce qui est indiqué dans le Chapitre 3, des mécanismes d'action chez l'humain sont proposés notamment le stress oxydant
	Transposabilité animal - Homme	5	Etude chez l'humain
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Basagaña <i>et al.</i> (2015) Qualité de l'étude jugée élevée par le WHO RoB avec des risques de biais faibles ou modérés pour la majorité des domaines. Étude en Europe exclusivement mais peu de villes. Lag bien défini, indicateur carbone élémentaire bien défini.
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction E-R	3	Niveau d'intérêt modéré
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Niveaux de confiance	Niveau de confiance global	4,5	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level ; PBPK : Modèle pharmacocinétique basé sur la physiologie.*

**Hospitalisations pour causes respiratoires**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	5	Niveau de plausibilité du lien de causalité « fort » selon le GT
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Absence de seuil à l'échelle de la population
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Hospitalisations pour causes respiratoires
	Convergence des études	3	Deux publications recensées dont toutes les fonctions (sauf une) vont dans le même sens et les intervalles de confiance se chevauchent. Résultat cohérent dans les publications combinant des événements de santé hétérogènes (hospitalisations et visites aux urgences). Convergence à noter avec les études sur PM.
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	5	Selon ce qui est indiqué dans le chapitre 3, des mécanismes sont suggérés pour l'asthme, la BPCO et les infections des voies respiratoires chez l'humain
	Transposabilité animal - Homme	5	Etude chez l'humain
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Basagaña <i>et al.</i> (2015) Qualité de l'étude jugée élevée par le WHO RoB avec des risques de biais faibles ou modérés pour la majorité des domaines. Étude en Europe exclusivement mais peu de villes. Lag bien défini, indicateur carbone élémentaire bien défini.
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction E-R	3	Niveau d'intérêt « modéré »
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Niveaux de confiance	Niveau de confiance global	4,4	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level ; PBPK : Modèle pharmacocinétique basé sur la physiologie. EC : carbone élémentaire.*

**Visites aux urgences pour asthme**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	5	Niveau de plausibilité du lien de causalité « fort » selon le GT
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Absence de seuil à l'échelle de la population
Choix de l'effet critique	Nature des effets	4	Visites aux urgences principalement liés à l'atteinte d'une fonction cardiorespiratoire globalement réversible (asthme)
	Convergence des études	4	Une seule publication recensée. Toutes les fonctions extraites vont dans le même sens (RR>1) et les intervalles se chevauchent (mais pas largement). Associations pas toujours statistiquement significatives. Convergence forte chez les enfants mais moindre (modérée à forte) pour tous âges. Convergence importante à noter avec les études sur PM.
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	5	Mécanismes de l'asthme connus chez l'humain
	Transposabilité animal - Homme	5	Etude chez l'humain
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Bi <i>et al.</i> (2023) : qualité de l'étude élevée selon analyse par WHO RoB. Indicateur carbone élémentaire bien défini, pas de mélange de lags, localisations hors Europe (Etats-Unis).
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction E-R	3	Niveau d'intérêt modéré
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Niveaux de confiance	Niveau de confiance global	4,4	

BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level ; RR : risque relatif

**Mortalité toutes causes cardiovasculaires**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
<b>Corpus de données</b>	Quantité et qualité	5	Niveau de plausibilité du lien de causalité « fort » selon le GT, sur la base d'études épidémiologique et toxicologique.
<b>Hypothèse de construction</b>	Sans seuil	5	Hypothèse d'absence de seuil à l'échelle de la population
<b>Choix de l'effet critique</b>	Nature des effets	5	Mortalité toutes causes cardiovasculaires
	Convergence des études	4	Sept publications recensées et 19 fonctions concentration-risque extraites pour les travaux. Un peu plus de la moitié montre des associations positives. Les intervalles de confiance sont plutôt étroits (sauf certaines fonctions de Basagaña <i>et al.</i> 2015) et se chevauchent.
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	5	Plusieurs mécanismes proposés et documentés dans la littérature pour carbone suie ainsi que pour PM en masse sur la santé cardiovasculaire (cf. chapitre 3).
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
<b>Choix de l'étude (ou des études) clé</b>	Qualité	5	Basagaña <i>et al.</i> (2015) Méta-analyse d'études en Espagne et en Italie. Considérée de bonne qualité selon l'outil WHO RoB avec des risques de biais faibles et modérées pour la majorité des domaines.
<b>Choix de la dose critique</b>	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	3	Niveau d'intérêt « modéré » pour dériver une VTR
<b>Ajustements</b>	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
<b>Niveaux de confiance</b>	Niveau de confiance global	4,6	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level*

**Mortalité toutes causes respiratoires**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	5	Niveau de plausibilité du lien de causalité « fort » selon le GT, sur la base d'études épidémiologiques et toxicologiques
Hypothèse de construction	Sans seuil	5	Hypothèse d'absence de seuil à l'échelle de la population
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Mortalité causes respiratoires
	Convergence des études	4	Six publications recensées et 17 fonctions concentration-risque extraites. Les estimations centrales sont presque toutes positives, les intervalles de confiance se chevauchent
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Des mécanismes sont documentés dans la littérature pour la santé respiratoire (cf. Chapitre 3)
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Basagaña <i>et al.</i> (2015) Méta-analyse d'études en Espagne et en Italie. Considérée de qualité élevée selon l'outil WHO RoB avec des risques de biais faibles et modérés pour la majorité des domaines.
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	3	Niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Niveaux de confiance	Niveau de confiance global	4,6	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.*

**Mortalité toutes causes non accidentelles**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	5	Niveau de plausibilité du lien de causalité « fort » selon le GT, sur la base d'études épidémiologiques et toxicologiques
Hypothèse de construction	Sans seuil	5	Hypothèse d'absence de seuil à l'échelle de la population
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Mortalité toutes causes non accidentelles
	Convergence des études	5	Sept publications recensées et 20 fonctions concentration-risque extraites. Les associations sont majoritairement positives, les intervalles de confiances se chevauchent
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Evènement de santé trop large pour en connaître le mécanisme exact mais preuves existantes sur les mécanismes d'effet sur santé respiratoire et santé cardiovasculaire (inclus dans la mortalité toutes causes)
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	4	Achilleos <i>et al.</i> (2017) Méta-analyse de 81 villes dont 4 en Europe issues de 8 publications. Qualité de la méta-analyse modérée selon l'évaluation par l'outil Moose (score : 28/34). Mélange de métriques mais avec une majorité examine carbone élémentaire (6 études / seulement 2 études sur carbone suie). Mélange de lags (1, 0-1, 3 ou 0-6).
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	3	Niveau d'intérêt « modéré » pour dériver une VTR
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Niveaux de confiance	Niveau de confiance global	4,5	

BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.

## **Annexe 7 : Tableaux d'extraction des fonctions concentration-risque et d'analyse du niveau d'intérêt de ces fonctions pour dériver la VTR long terme pour le carbone suie**

Le Tableau 27 de la présente annexe décrit brièvement les publications sélectionnées lors de la recherche bibliographique et inclut l'ensemble des fonctions concentration-risque extraites de ces publications pour décrire la relation entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et la survenue des événements de santé d'intérêt. Le Tableau 28 de la présente annexe présente quant à lui les niveaux d'intérêt de ces fonctions pour dériver une VTR.

Tableau 27. Description des fonctions concentration-risque (CR) examinant l'exposition à long terme au « carbone suie » des particules de l'air ambiant

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
1	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	11 études (dont 8 en Europe)	1,02 [1,001,04]	1,00	84	0,019803
2	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	8 études dont 5 en Europe, risque de biais considéré faible ou modéré	1,03 [1,00-1,06]	1,00	69	0,029559
3	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	8 études en Europe	1,02 [1,01-1,04]	1,00	84	0,019803
4	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Hoek <i>et al.</i> (2013)	EC, BC & BS – fraction non renseignée	Méta-analyse de publications	8 études dont 5 en Europe	1,06 [1,05-1,07]	1,00	0	0,059212
5	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	Étude individuelle multicentrique	2 cohortes dans 2 villes danoises	1,09 [1,04-1,15]	1,00	NA	0,086178
6	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	Étude individuelle multicentrique	2 cohortes dans 2 villes danoises ; analyse ajustée sur le bruit	1,04 [0,98-1,11]	1,00	NA	0,039221
7	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	Méta-analyse de cohortes	4 cohortes dans 3 villes suédoise; exposition sur 1-5 ans	1,09 [1,00-1,18]	1,00	0	0,086178
8	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	Méta-analyse de cohortes	4 cohortes dans 3 villes suédoise; exposition sur 6-10 ans	1,09 [0,98-1,22]	1,00	28	0,086178
9	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	Projet ELAPSE : 7 cohortes en Europe (6 cohortes nationales et 1 cohorte ville (Rome))	1,039 [1,018-1,059]	5,00.10 <sup>-6</sup>	97,1	HR* = 3,07E-02 BC <sup>3</sup> - 2,11E-01 BC <sup>2</sup> + 4,56E-01 BC + 7,84E-01 (R <sup>2</sup> =0,98). Modèle (splines) digitalisé à partir de la Figure 3C de Stafoggia <i>et al.</i> (2022).
10	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <3,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,04 [1,019-1,06]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,078441
11	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,042 [1,021-1,063]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,082284

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
12	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,045 [1,022-1,067]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,088034
13	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	6 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,061 [1,032-1,092]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,118424
14	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	4 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,081 [0,966-1,21]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,155773
15	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 8 cohortes en Europe, dont 1 française	1,081 [1,065-1,098]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = -1,01E-02 BC <sup>2</sup> + 2,29E-01 BC + 9,50E-01 (R <sup>2</sup> = 0,98). Modèle ensemble digitalisé à partir de la Figure S7 de Strak <i>et al.</i> (2021).
16	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	8 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,084 [1,067-1,101]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,161316
17	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	8 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,091 [1,074-1,109]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,174189
18	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	7 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,107 [1,087-1,128]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,203307
19	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,125 [1,086-1,165]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,235566
20	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,041 [0,942-1,15]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,080364
21	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	3 études dont 0 en Europe, ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux	1,013 [1,004-1,022]	0,605	ND	0,020622
22	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Etude individuelle multicentrique	Cohorte Gazel, ensemble du territoire français métropolitain	1,14 [1,07-1,22]	8,60.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = 1,88E-02 BC <sup>3</sup> - 7,32E-02 BC <sup>2</sup> + 1,06E-01 BC + 9,59E-01 (R <sup>2</sup> =1,00). Modèle (splines) digitalisé à partir de la figure 1 de Yang <i>et al.</i> (2021).

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
23	Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Etude individuelle multicentrique	Cohorte Gazel, ensemble du territoire français métropolitain, méthode des résidus	1,17 [1,1-1,24]	8,60.10 <sup>-6</sup>	NA	0,182562
24	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	6 études dont 3 en Europe	1,03 [0,98-1,32]	1,00	16	0,029559
25	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Ljungman <i>et al.</i> (2019)	BC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de cohortes	4 études de cohorte en Suède, décès et hospitalisations considérés ensemble comme marqueur de l'incidence	1,041 [1,004-1,08]	0,31	0,00	0,129619
26	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 6 cohortes en Europe (12 sous-cohortes), modèle ajusté sur variable contextuelle (revenu moyen du quartier)	1,06 [1,02-1,10]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = -3,67E-03 BC <sup>2</sup> + 1,39E-01 BC + 9,95E-01 (R <sup>2</sup> =9,98E-01). Modèle digitalisé à partir de la Figure S3A (modèle ensemble) de Wolf <i>et al.</i> (2021).
27	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 6 cohortes en Europe (12 sous-cohortes), modèle NON ajusté sur variable contextuelle (revenu moyen du quartier)	1,07 [1,03-1,10]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,135317
28	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous-cohortes), sous-groupe avec concentration moyenne <3,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,06 [1,02-1,10]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,116538
29	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous-cohortes), ELAPSE - sous-groupe avec concentration moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,06 [1,02-1,10]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,116538
30	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous-cohortes), ELAPSE - sous-groupe avec concentration moyenne <2,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,06 [1,02-1,1]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,116538

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
31	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous-cohortes), ELAPSE - sous-groupe avec concentration moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,11 [1,04-1,19]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,208720
32	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (8 sous-cohortes), ELAPSE - sous-groupe avec concentration moyenne <1,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,17 [0,98-1,40]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,314007
33	Santé cardiovasculaire	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (7 sous-cohortes), ELAPSE - sous-groupe avec concentration moyenne <0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,73 [0,48-6,23]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	1,096243
34	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements cardiopathies ischémiques	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	5 études dont 3 en Europe	1,01 [0,99-1,03]	1,00	0	0,009950
35	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements cardiopathies ischémiques	Ljungman <i>et al.</i> (2019)	BC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de cohortes	4 études de cohorte en Suède, décès et hospitalisations considérés ensemble comme marqueur de l'incidence	1,001 [0,973-1,032]	0,31	0,00	0,003224
36	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements cardiopathies ischémiques	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC	Méta-analyse de publications	3 études	1,066 [1,009-1,127]	1,00	ND	0,063913
37	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 6 cohortes en Europe (12 sous cohortes), modèle ajusté sur variable contextuelle (revenu moyen du quartier)	1,02 [0,99-1,06]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = 7,90E-03 BC <sup>2</sup> + 1,99E-02 BC + 1,00 (R <sup>2</sup> =0,99). Modèle digitalisé à partir de la Figure S3B (modèle ensemble) de Wolf <i>et al.</i> (2021).
38	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 6 cohortes en Europe (12 sous cohortes), modèle NON ajusté sur variable contextuelle (revenu moyen du quartier)	1,02 [0,99-1,05]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,039605

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
39	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous cohortes) - sous-groupe avec cc moyenne <3,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,02 [0,99-1,06]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,039605
40	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous cohortes) sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,02 [0,99-1,05]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,039605
41	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous cohortes) - sous-groupe avec cc moyenne <2,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,02 [0,99-1,06]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,039605
42	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (12 sous cohortes) - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,02 [0,97-1,08]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,039605
43	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (8 sous cohortes) - sous-groupe avec cc moyenne <1,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	0,88 [0,76-1,01]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	-0,255667
44	Santé cardiovasculaire	Incidence d'évènements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe (7 sous cohortes) - sous-groupe avec cc moyenne <0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	0,76 [0,32-1,79]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	-0,548874
45	Santé cardiovasculaire	Incidence d'infarctus du myocarde	Cesaroni <i>et al.</i> (2014)	PM Abs	Méta-analyse de cohortes	Projet ESCAPE : 11 cohortes en Europe	1,1 [0,98-1,24]	1,00.10 <sup>-5</sup>	<5	0,095310
46	Santé cardiovasculaire	Maladies cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC	Méta-analyse de publications	5 études (dont au moins 1 en Europe)	1,068 [1,004-1,135]	1,00	81,50	0,065788
47	Santé cardiovasculaire	Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	6 études (dont 4 en Europe)	1,05 [0,99-1,11]	1,00	76	0,048790
48	Santé cardiovasculaire	Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	4 études en Europe	1,05 [1,01-1,08]	1,00	0	0,048790
49	Santé cardiovasculaire	Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 8 cohortes en Europe dont 1 française	1,078 [1,033-1,125]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = 2,83E-02 BC <sup>2</sup> + 7,10E-02 BC + 9,90E-01 (R <sup>2</sup> = 0,998). Modèle ensemble digitalisé à partir de la Figure S10 de Strak <i>et al.</i> (2021).

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
50	Santé cardiovasculaire	Mortalité pour causes cérébro-vasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 8 cohortes en Europe dont 1 française	1,075 [1,016-1,138]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = 1,17E-02 BC <sup>2</sup> + 1,23E-01 BC + 9,89E-01 (R <sup>2</sup> = 0,999). Modèle ensemble digitalisé à partir de Figure S9 de Strak <i>et al.</i> (2021).
51	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	9 études (dont 7 en Europe)	1,02 [1-1,04]	1,00	69	0,019803
52	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	7 études en Europe	1,03 [0,99-1,06]	1,00	74	0,029559
53	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	Etude individuelle multicentrique	2 cohortes dans 2 villes danoises	1,16 [1,05-1,27]	1,00	NA	0,148420
54	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	Etude individuelle multicentrique	2 cohortes dans 2 villes danoises ; analyse ajustée sur le bruit	1,09 [1,01-1,18]	1,00	NA	0,086178
55	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	Méta-analyse de cohortes	4 cohortes dans 3 villes suédoise ; exposition sur 1-5 ans	1,05 [0,93-1,19]	1,00	0	0,048790
56	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	Méta-analyse de cohortes	4 cohortes dans 3 villes suédoise ; exposition sur 6-10 ans	1,11 [0,98-1,27]	1,00	0,00	0,104360
57	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	Projet ELAPSE : 7 cohortes en Europe (6 cohortes nationales et 1 cohorte ville (Rome))	1,022 [1,004-1,04]	5,00.10 <sup>-6</sup>	91,2	0,043523
58	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <3,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,022 [1,004-1,04]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,043523
59	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,024 [1,004-1,045]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,047433
60	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> ABS	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,024 [1,003-1,047]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,047433
61	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	6 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,042 [1,014-1,071]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,082284

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
62	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	4 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,061 [0,941-1,195]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,118424
63	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 8 cohortes en Europe dont 1 française	1,085 [1,055-1,116]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = 3,51E-03 BC <sup>2</sup> + 1,78E-01 BC + 9,9E-01 (R <sup>2</sup> = 0,99). Modèle ensemble digitalisé à partir de la Figure S8 de Strak <i>et al.</i> (2021).
64	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	8 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,087 [1,056-1,119]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,166843
65	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	8 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,09 [1,058-1,123]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,172355
66	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	7 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,107 [1,07-1,145]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,203307
67	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,15 [1,072-1,234]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,279524
68	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	0,895 [0,738-1,086]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	-0,221863
69	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	2 études dont 0 en Europe, ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux	1,049 [1-1,098]	0,605	ND	0,079257
70	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Etude individuelle multicentrique	Cohorte Gazel, ensemble du territoire français métropolitain	1,15 [0,95-1,38]	5,70.10 <sup>-6</sup>	NA	HR* = 2,17E-02 BC <sup>4</sup> - 2,20E-01 BC <sup>3</sup> - 1,01E+00 BC <sup>2</sup> - 2,32E+00 BC + 3,09E+00 (R <sup>2</sup> =1,00). Modèle (splines) digitalisé à partir de la Figure S2 de Yang <i>et al.</i> (2021).
71	Santé cardiovasculaire	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Etude individuelle multicentrique	Cohorte Gazel, ensemble du territoire français métropolitain, méthode des résidus	1,16 [0,98-1,38]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,260386
72	Santé respiratoire	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 3 cohortes au Danemark et en Suède	1,11 [1,06-1,15]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR* = -9,29E-02 BC <sup>2</sup> + 4,48E-01 BC + 6,18E-01 (R <sup>2</sup> = 0,99). Modèle (splines) digitalisé à partir de Figure 2 de Liu <i>et al.</i> (2021b).

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
73	Santé respiratoire	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,11 [1,06-1,15]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,208720
74	Santé respiratoire	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,11 [1,06-1,16]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,208720
75	Santé respiratoire	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe, dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,11 [1,07-1,16]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,208720
76	Santé respiratoire	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,16 [1,08-1,25]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,296840
77	Santé respiratoire	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,19 [0,95-1,51]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,347907
78	Santé respiratoire	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	1 cohorte en Europe, dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	3,81 [0,42-34,95]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	2,675258
79	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Jacquemin <i>et al.</i> (2015)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse de cohortes	Projet ESCAPE : 6 cohortes en Europe incluses dont 3 populations françaises	1,06 [0,95-1,19]	1,00.10 <sup>-5</sup>	44,5	0,058269
80	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 3 cohortes au Danemark et en Suède	1,15 [1,08-1,23]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR* = -1,87E-01 BC <sup>2</sup> + 7,04E-01 BC + 4,72E-01 (R <sup>2</sup> = 0,97). Modèle (splines) digitalisé à partir de Figure 2 de Liu <i>et al.</i> (2021a).
81	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,15 [1,08-1,23]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,279524
82	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,15 [1,08-1,23]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,279524
83	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,15 [1,08-1,23]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,279524
84	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,17 [1,09-1,23]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,314007
85	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,33 [1,02-1,74]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,570358

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
86	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	1 cohorte en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	0,77 [0,15-3,97]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	-0,522730
87	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	5 études dont 3 en Europe	1,11 [0,94-1,31]	1,00	47	0,104360
88	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	4 études dont 3 en Europe, risque de biais considéré faible	1,22 [1,07-1,4]	1,00	ND	0,198851
89	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Bowatte <i>et al.</i> (2014)	PM Abs	Méta-analyse de publications	3 études de cohorte (1 en Europe), enfants jusqu'à 8 ans	1,2 [1,05-1,38]	1,00.10 <sup>-5</sup>	19,30	0,182322
90	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Gehring <i>et al.</i> (2015)	PM Abs	Méta-analyse de cohortes	Projet MEDALL : 4 études de cohorte en Europe, enfants jusqu'à 16 ans	1,29 [1-1,66]	1,00.10 <sup>-5</sup>	0	0,254642
91	Santé respiratoire	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Khreis <i>et al.</i> (2017)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse de publications	8 études (6 en Europe), enfants de 5 à 14 ans	1,08 [1,03-1,14]	5,00.10 <sup>-6</sup>	0,00	0,153922
92	Santé respiratoire	Mortalité pour cause BPCO	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 8 cohortes en Europe, dont 1 en France	1,119 [1,034-1,211]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = 2,44E-02 BC <sup>2</sup> + 2,35E-01 BC + 9,90E-01 (R <sup>2</sup> = 0,999). Modèle ensemble digitalisé à partir de Figure S11 de Strak <i>et al.</i> (2021).
93	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	8 études (dont 6 en Europe)	1,01 [0,98-1,05]	1,00	64	0,009950
94	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	6 études en Europe	1,02 [0,98-1,07]	1,00	58	0,019803
95	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	Etude individuelle multicentrique	2 cohortes dans 2 villes danoises	1 [0,9-1,12]	1,00	NA	0,000000
96	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	Méta-analyse de cohortes	4 cohortes dans 3 villes suédoise ; exposition sur 1-5 ans	0,81 [0,32-2,05]	1,00	74	-0,210721
97	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	Méta-analyse de cohortes	4 cohortes dans 3 villes suédoise ; exposition sur 6-10 ans	0,77 [0,26-2,33]	1,00	84	-0,261365
98	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	Projet ELAPSE : 7 cohortes en Europe (6 cohortes nationales et 1 cohorte ville (Rome))	1,053 [1,021-1,085]	5,00.10 <sup>-6</sup>	92,5	0,103286

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
99	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <3,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,054 [1,023-1,086]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,105185
100	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,058 [1,028-1,09]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,112761
101	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	7 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <2,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,066 [1,036-1,098]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,127827
102	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	6 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,106 [1,038-1,179]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,201500
103	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Méta-analyse d'études	4 cohortes en Europe - sous-groupe avec cc moyenne <1,0.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,165 [1,096-1,238]	5,00.10 <sup>-6</sup>	ND	0,305442
104	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ELAPSE : 8 cohortes en Europe, dont 1 en France	1,084 [1,02-1,151]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	HR = 5,29E-03 BC <sup>2</sup> + 1,88E-01 BC + 9,80E-01 (R <sup>2</sup> = 0,999). Modèle ensemble digitalisé à partir de Figure S11 de Strak <i>et al.</i> (2021).
105	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	8 cohortes en Europe, dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,085 [1,021-1,154]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,163160
106	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	8 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,1 [1,034-1,171]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,190620
107	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	7 cohortes en Europe dont 1 en France - sous-groupe avec cc moyenne <2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,119 [1,044-1,2]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,224871
108	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	6 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,127 [0,99-1,284]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,239118
109	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	3 cohortes en Europe dont 0 en France - sous-groupe avec cc moyenne <1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup>	1,186 [0,798-1,763]	5,00.10 <sup>-6</sup>	NA	0,341173
110	Santé respiratoire	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	2 études dont 0 en Europe, ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> totaux	0,989 [0,904-1,074]	0,605	ND	-0,018102
111	Santé périnatale	Petit poids de naissance	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	Méta-analyse de publications	5 études dont 2 en Europe, exposition grossesse entière	1,01 [0,99-1,04]	1,00	12	0,009950

N	Catégorie	Evènement de santé	Référence	Métrique considérée	Type d'étude ou d'analyse	Description synthétique	Fonction CR [intervalle de confiance]	Incrément de concentration	Hétérogénéité (I <sup>2</sup> en %)	Modèle de la forme de la relation concentration-risque
112	Santé périnatale	Petit poids de naissance	Brauer <i>et al.</i> (2008)	PM Abs	Etude individuelle multicentrique	1 étude (Canada), exposition grossesse entière - citée dans Tsoli <i>et al.</i> (2019)	1 [0,95-1,07]	1,00.10 <sup>-5</sup>	NA	0,000000
113	Santé périnatale	Petit poids de naissance	Gehring <i>et al.</i> (2014)	PM Abs	Etude individuelle multicentrique	1 étude (Canada), exposition grossesse entière - citée dans Tsoli <i>et al.</i> (2019)	1,03 [0,97-1,09]	1,00.10 <sup>-5</sup>	NA	0,029559
114	Santé périnatale	Petit poids de naissance	Kingsley <i>et al.</i> (2017)	BC fraction PM <sub>2,5</sub>	Etude individuelle multicentrique	1 étude (USA), exposition grossesse entière - citée dans Tsoli <i>et al.</i> (2019)	1,01 [0,93-1,1]	0,11	NA	0,090458
115	Santé périnatale	Petit poids de naissance	Pedersen <i>et al.</i> (2013)	PM <sub>2,5</sub> Abs	Analyse multi-pays poolée	Projet ESCAPE, 14 cohortes dans 12 pays en Europe, exposition grossesse entière - citée dans Tsoli <i>et al.</i> (2019)	1,17 [0,95-1,39]	1,00.10 <sup>-5</sup>	NA	0,157004
116	Santé périnatale	Petit poids de naissance	Sun <i>et al.</i> (2016)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	Méta-analyse de publications	4 études dont 0 en Europe, exposition grossesse entière	1,105 [1,042-1,172]	1,00	25,23	0,099845

Abréviations : Abs : absorbance ; AVC : accident vasculaire cérébral ; BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; cc : concentration ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of low-level air pollution : a study in Europe ; ESCAPE : European study of cohorts for air pollution effects ; ND : non disponible ; NA : non applicable. \*Le modèle non-linéaire est non monotone et/ou ne montre pas d'effet sur la santé, ce qui le rend non exploitable pour dériver une éventuelle valeur candidate à la VTR long terme pour le « carbone suie » – dans ce cas, la fonction concentration-risque supposant une relation log linéaire a été utilisée.

Tableau 28. Analyse du niveau d'intérêt pour dériver une VTR des fonctions concentration-risque examinant l'exposition à long terme « carbone suie » des particules de l'air ambiant

N	Evènement de santé	Référence	Indicateur d'exposition	Méta-analyse, analyse multi centrique ou poolée ?	Risque précis ?	Forme (autre que log linéaire) de la relation disponible ?	Cohérence des données de santé ?	Inclusion études en France ou Europe ?	Faible hétérogénéité (quand méta analyse) ?	Fin de la période de suivi des cohortes ?	Commentaires	Intérêt de la fonction pour dériver une VTR
<b>Mortalité toutes causes</b>												
1	Mortalité toutes causes non accidentelles	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse faisant suite à une revue de la littérature et une évaluation du poids de la preuve (= confiance élevée dans la présence d'une association pour EC). Méta-analyse incluant 11 études dont 8 études en Europe (incluant 1 étude ESCAPE). Evaluation exposition par modélisations (occupation des sols, dispersion ou chimie-transport). Différentes métriques d'exposition utilisées dans les études (BS, BC, PM <sub>2,5</sub> Abs), donc transformés en équivalent EC par les auteurs (ajout d'une incertitude). Période de suivi mixte : quelques études <2010. Méta-risque faible mais statistiquement significatif, très forte hétérogénéité (I <sup>2</sup> = 84 %). Une analyse de sensibilité restreinte aux 9 études avec une forte spécificité au trafic routier confirme le résultat principal (méta-RR = 1,03 [1,00-1,05]).	MODERE
2	Mortalité toutes causes non accidentelles	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 1). Méta-analyse incluant 8 études (dont 5 en Europe) avec risque de biais considéré faible ou modéré (i.e. les études à fort risque de biais ont été exclues). Le résultat confirme le résultat principal (méta-risque faible mais statistiquement significatif). Hétérogénéité en baisse mais toujours élevée (69% vs 86%).	MODERE
3	Mortalité toutes causes non accidentelles	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 1). Méta-analyse n'incluant que 8 études en Europe (au lieu de 11), dont 1 étude sur ESCAPE. Résultat similaire à ce qui est observé dans l'analyse principale, avec de nouveau une forte hétérogénéité (84%).	MODERE
4	Mortalité toutes causes non accidentelles	Hoek <i>et al.</i> (2013)	EC, BC, BS - pas d'info sur la fraction	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	ANCIENNES	Méta-analyse de publications incluant 8 études dont 5 en Europe. Evaluation de l'exposition (EC) à l'échelle de la ville uniquement, échelle plus fine (notamment proximité du trafic) non disponible. Concentration élevée dans certaines cohortes, probablement en lien avec les périodes de suivi anciennes. Les études considèrent les métriques EC, BC et BS ; une standardisation pour 1 µg.m <sup>-3</sup> a été faite par les auteurs mais pas de conversion préalable à la méta-analyse.	MODERE
5	Mortalité toutes causes non accidentelles	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Etude individuelle multicentrique incluant deux villes danoises. Population large (n=49 564). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Suivi long de 1979 à 2015. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) pris en compte. Méta-risque positif et statistiquement significatif.	MODERE

6	Mortalité toutes causes non accidentelles	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 5). Ici, intérêt particulier des auteurs pour le rôle du bruit comme facteur de confusion de l'association entre pollution atmosphérique et santé (i.e. ajustement sur le bruit dans le modèle). Ce résultat secondaire est plus faible que le résultat principal (non ajusté sur le bruit) et n'est pas statistiquement significatif. Donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
7	Mortalité toutes causes non accidentelles	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Méta-analyse de 4 études de cohortes (dans 3 villes) en Suède. Population large (n=68 679). Estimation de l'exposition sur une période de 1 à 5 ans avant le décès. Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Hétérogénéité nulle entre les études pour cette fenêtre d'exposition. Méta-risque positif et statistiquement significatif.	MODERE
8	Mortalité toutes causes non accidentelles	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 7). Estimation de l'exposition sur une période de 6 à 10 ans avant le décès. Faible hétérogénéité entre les études pour cette fenêtre d'exposition ( $I^2 = 28\%$ ). Méta-risque positif mais n'atteint pas la significativité statistique.	MODERE
9	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	RECENTES	Méta-analyse de 7 études de cohortes dans 7 pays en Europe (6 cohorte nationales et 1 étude ville, pas de donnée française) dans le cadre du projet ELAPSE. Association statistiquement significative mise en évidence avec une forte hétérogénéité entre les études pour cet événement de santé ( $I^2 = 98\%$ ). Données de registres utilisées donc population très large (n=28 153 138). Le modèle (Cox) a été ajusté sur plusieurs cofacteurs d'intérêt sauf IMC et tabac au niveau individuel (manquants pour la majorité des cohortes) donc un ajustement indirect a été fait. Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition à Abs à l'adresse de résidence. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Fin de suivi : 2011-2017.	FORT
10	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 9). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $3.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
11	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 9). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $2,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
12	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 9). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $2.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
13	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 9). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $1,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
14	Mortalité toutes causes non accidentelles	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 9). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $1.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée, uniquement 4 cohortes et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE

15	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse poolée de 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE (dont une cohorte française (E3N)). Standardisation des données de santé et d'exposition faite. Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles (<3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque, avec la classe de modèle SCHIF (modèle ensemble retenu ici). Association positive et statistiquement significative mise en évidence.	FORT
16	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 15). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
17	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 15). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
18	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 15). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
19	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 15). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée et 6 cohortes uniquement donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
20	Mortalité toutes causes non accidentelles	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 15). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non caractérisée et 3 cohortes uniquement donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
21	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	ND	INTER-MEDIAIRES	Méta-analyse de 3 publications identifiées grâce à une revue de la littérature. Seules des publications incluant un ajustement sur la masse totale des PM <sub>2,5</sub> sont incluses dans la méta-analyse. Liste détaillée des études incluses non fournie par les auteurs, une prise de contact a été faite pour récupérer ces informations. Les 3 études sont aux Etats-Unis, pas de localisations en Europe. Les résultats extraits ont été recalculés à partir des données envoyées (méta-risque positif et statistiquement significatif). Hétérogénéité nulle entre les études (?). Pas d'information sur standardisation des données de santé mais supposée bonne car évènement de santé large et bien défini. Les métriques d'exposition BC et EC sont considérées dans la méta-analyse, sans conversion préalable par les auteurs.	FAIBLE
22	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Etude individuelle multicentrique, cohorte Gazel, France métropolitaine, 28 années de suivi, de 1989 à 2017. Population large (n=19 906). Association positive et statistiquement significative. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition (exploitation des modélisations carbone suie du projet ESCAPE puis back-extrapolation jusqu'au début du suivi). Bon niveau d'ajustement, y compris consommation de fruits et légumes. Imputation des données manquantes. Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation par une fonction splines à 2 degrés de liberté : plutôt "plate" aux concentrations les plus faibles <2.10 <sup>-5</sup> et intervalle de confiance très large aux concentrations >5.10 <sup>-5</sup> (car effectif très bas). Interaction observée avec le tabac : association plus forte chez les non-fumeurs.	FORT
23	Mortalité toutes causes non accidentelles	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 22). Analyse statistique exploitant les résidus du modèle principal, d'intérêt pour différencier les effets du carbone suie de ceux des PM totaux en masse. Résultat positif et statistiquement significatif. Néanmoins, résultat difficilement interprétable car exprimé pour une augmentation d'un incrément de résidus. Donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

Santé cardiovasculaire												
24	Incidence d'AVC	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse de publications, identifiées grâce à une revue de la littérature. Evaluation du poids des preuves menée par les auteurs (= confiance faible dans les preuves pour la présence d'une association pour EC). Dans la méta-analyse, 6 études incluses dont 3 européennes. Méta-risque faible et non significatif, hétérogénéité faible entre études ( $I^2 = 16\%$ ). Poids important de l'étude canadienne dans la méta-analyse (85%) mais résultat similaire après exclusion de cette publication. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Les études examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent EC a été effectuée par les auteurs au préalable de la méta-analyse.	FAIBLE
25	Incidence d'AVC	Ljungman <i>et al.</i> (2019)	BC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	ANCIENNES, INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse de 4 études de cohortes suédoises. Evaluation de l'exposition par modèle de dispersion à haute résolution spatiale basé sur des données locales d'émission (bonnes performances). Faibles concentrations (valeurs moyennes pour l'ensemble de la population : BC total 0,76 µg.m <sup>-3</sup> ). Hospitalisation et décès sont considérés ensemble (croisement de bases de données) pour définir l'indicateur incidence d'AVC. Association mise en évidence, statistiquement significative. Hétérogénéité nulle entre les études dans la méta-analyse.	FAIBLE
26	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse multi-pays poolée de 6 cohortes (12 sous-cohortes) en Europe (sans la France) dans le cadre du projet ELAPSE. Estimation de l'association ajustée sur tous les cofacteurs d'intérêt, y compris variables contextuelles (revenu moyen du quartier, 2001). Bonne qualité du modèle d'évaluation de l'exposition (modèle occupations des sols). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Incidence de l'AVC défini par couplage entre registres d'hôpital et registres de mortalité pour toutes les cohortes sauf Allemagne - donc globalement bonne standardisation des données de santé. Fin de suivi récent : 2011-15. Association positive statistiquement significative mise en évidence. Niveau d'intérêt modéré en raison de la définition de l'évènement de santé, difficilement reproductible en données de fond.	MODERE
27	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire au résultat principal (ligne 26). Ici, modèle ajusté sur tous les facteurs individuels uniquement (i.e. pas de variable contextuelle). Forme (non-linéaire) de la relation non caractérisée pour cette analyse. Donc intérêt moindre par rapport l'analyse principale.	FAIBLE
28	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire au résultat principal (ligne 26). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible. Donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
29	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire au résultat principal (ligne 26). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
30	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire au résultat principal (ligne 26). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
31	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire au résultat principal (ligne 26). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
32	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire au résultat principal (ligne 26). Sous-groupe des participants (8 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur	FAIBLE

											à l'analyse principale mais non statistiquement significatif, forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt faible.	
33	Incidence d'AVC	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	NON	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire au résultat principal (ligne 26). Sous-groupe des participants (7 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à l'analyse principale mais risque non précis (borne sup/ borne inf > 10 + non statistiquement significatif), forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
34	Incidence d'événements cardiopathies ischémiques	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse faisant suite à une revue de la littérature et une évaluation du poids de la preuve (=confiance modérée dans la présence d'une association pour EC). Dans la méta-analyse, 5 publications incluses dont 3 en Europe. Méta-risque faible, non significatif, hétérogénéité entre études nulle. Poids important de l'étude Canadienne dans la méta-analyse (96%). Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS, et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse.	FAIBLE
35	Incidence d'événements cardiopathies ischémiques	Ljungman <i>et al.</i> (2019)	BC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	ANCIENNES, INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse de 4 cohortes suédoises. Hospitalisation et décès sont considérés ensemble pour définir l'indicateur incidence de cardiopathie ischémique. Modèle de dispersion à haute résolution spatiale basé sur des données locales d'émission (bonnes performances). Faibles concentrations (valeurs moyennes pour l'ensemble des études : BC total 0,76 µg.m <sup>-3</sup> ). Pas d'association mise en évidence (risque proche du 1, non significatif) et hétérogénéité nulle entre les études.	FAIBLE
36	Incidence d'événements cardiopathies ischémiques	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC	OUI	OUI	NON	OUI	ND	NON	ND	Méta-analyse de publications (3 études) identifiées par une revue de la littérature. Méta-risque significatif rapporté par les auteurs, mais pas de présentation du graphique et hétérogénéité non disponible. Pas d'information donnée par les auteurs sur les 3 études incluses donc i) incertitudes sur la définition de l'évènement de santé (mortalité et/ou morbidité), ii) incertitudes sur les métriques considérées et ii) incertitudes sur les localisations (Europe ou non).	FAIBLE
37	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse multi-pays poolée de 6 cohortes (12 sous cohortes) en Europe (sans la France) dans le cadre du projet ELAPSE. Population large (10 071 cas). Méta-risque positif mais non significatif. Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre la concentration en PM <sub>2,5</sub> Abs et le risque d'événements coronariens aigus. Ajustement sur plusieurs variables dont contextuelles appliqué. Incidence définie par couplage entre registres de sortie d'hôpital et registres de décès pour toutes les cohortes sauf en Allemagne.	FAIBLE
38	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 37). Ici, modèle ajusté sur plusieurs cofacteurs individuels (i.e. pas de facteur contextuel). Méta-risque similaire au résultat de l'analyse principale. Forme de la relation (non linéaire) non caractérisée.	FAIBLE
39	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 37). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat similaire à celui de l'analyse principale, non statistiquement significatif. Forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible. Niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
40	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 37). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat similaire à celui de l'analyse principale, non statistiquement significatif. Forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible. Niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
41	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 37). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat similaire à celui de l'analyse principale, non statistiquement significatif. Forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible. Niveau d'intérêt faible.	FAIBLE

42	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 37). Sous-groupe des participants (12 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat similaire à celui de l'analyse principale, non statistiquement significatif. Forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible. Niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
43	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 37). Sous-groupe des participants (8 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à l'analyse principale mais non statistiquement significatif et forme de la relation non caractérisée. Niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
44	Incidence d'événements coronariens aigus	Wolf <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 37). Sous-groupe des participants (6 sous-cohortes) avec concentration moyenne annuelle inférieure à 0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à l'analyse principale mais très imprécis, non statistiquement significatif et forme de la relation non caractérisée. Niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
45	Incidence d'infarctus du myocarde	Cesaroni <i>et al.</i> (2014)	PM Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES & ANCIENNES	Méta-analyse de 11 cohortes en Europe dans le cadre du projet européen ESCAPE. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à PM <sub>2,5</sub> Abs à l'adresse de résidence (modèle d'occupations des sols avec une bonne performance dans la majorité des cohortes). Registres des hôpitaux et registres de décès ont été combinés pour estimer l'incidence de l'infarctus du myocarde, effort de standardisation entre cohortes. Suivi moyen : 11,5 ans. Estimation centrale du méta-risque supérieure à 1 mais association non statistiquement significative. Aucune analyse de sensibilité ou en sous-groupes disponible.	FAIBLE
46	Maladies cardiovasculaires	Song <i>et al.</i> (2022)	BC & EC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse de publications (5 études dont au moins 1 en Europe) identifiées par une revue de la littérature. Une analyse du risque de biais a été faite par les auteurs : faible risque de biais pour cet événement de santé. Méta-risque statistiquement significatif mais forte hétérogénéité (I <sup>2</sup> = 81 %), peu d'informations sur les études incluses (donc incertitudes sur les métriques considérées et les localisations) et, <i>a priori</i> , des études examinant la mortalité et la morbidité ont été combinées - ce qui est difficilement reproductible en données de fond.	FAIBLE
47	Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse faisant suite à une revue de la littérature et une évaluation du poids de la preuve (=confiance modérée dans la présence d'une association pour EC). Dans la méta-analyse, 6 études incluses dont 4 en Europe. Ces 6 études sont également incluses dans la méta-analyse sur la mortalité cardiovasculaire. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Différentes modélisations de l'exposition dans les études : occupations des sols, dispersion et chimie-transport. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS, et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Méta-risque à la limite de la significativité statistique, hétérogénéité élevée (76%). Poids important (27-30%) d'une étude à Hong Kong et d'une étude à Rome - pour cette dernière, on peut noter que l'ajustement sur le tabac n'avait pas été réalisé.	MODERE
48	Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 47). Méta-analyse n'incluant que les 4 études en Europe (incluant une étude du projet ESCAPE). Le méta-risque est similaire à celui de l'analyse principale et atteint la significativité statistique. Hétérogénéité en baisse par rapport à l'analyse principale (0%).	MODERE
49	Mortalité pour cause cardiopathie ischémique	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse poolée de 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE (dont une cohorte française (E3N)). Standardisation des données de santé et d'exposition faite. Résolutions spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles (<3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et	FORT

											risque, avec la classe de modèle SCHIF (modèle ensemble retenu ici). Association positive et statistiquement significative mise en évidence.	
50	Mortalité pour causes cérébro-vasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse poolée de 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE (dont une cohorte française (E3N)). Standardisation des données de santé et d'exposition faite. Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles (<3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque, avec la classe de modèle SCHIF (modèle ensemble retenu ici). Association positive et statistiquement significative mise en évidence.	FORT
51	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse faisant suite à une revue de la littérature et une évaluation du poids de la preuve (=confiance élevée dans la présence d'une association pour EC). Dans la méta-analyse, 9 études incluses dont 7 études en Europe. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Différentes modélisations de l'exposition dans les études : occupations des sols, dispersion et chimie-transport. Définitions des événements de santé globalement homogènes entre études. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Période de suivi mixte : quelques études <2010. Méta-risque faible mais statistiquement significatif. Hétérogénéité modérée entre études (I <sup>2</sup> = 69 %).	MODERE
52	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 51). Méta-analyse n'incluant que les 7 études en Europe (dont 1 étude du projet ESCAPE). Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Méta-risque faible, très légèrement augmenté par rapport à l'analyse principale, mais devient limite significatif. Hétérogénéité forte (I <sup>2</sup> = 74 %).	MODERE
53	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Étude individuelle multicentrique incluant deux villes danoises. Population large (n=49 564). Résolutions spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Suivi long de 1979 à 2015. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Méta-risque élevé et statistiquement significatif.	MODERE
54	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 53). Ici, intérêt particulier des auteurs pour le rôle du bruit comme facteur de confusion de l'association entre pollution atmosphérique et santé (i.e. ajustement sur le bruit dans le modèle). Méta-risque en baisse par rapport à l'analyse principale mais toujours statistiquement significatif.	MODERE
55	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Méta-analyse de 4 études de cohortes dans 3 villes suédoises. Population large (n=68 679). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Estimation de l'exposition sur une période de 1 à 5 ans avant le décès. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Absence d'hétérogénéité entre les études. Méta-risque positif mais non statistiquement significatif.	FAIBLE
56	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 55). Estimation de l'exposition sur une période de 6 à 10 ans avant le décès. Absence d'hétérogénéité entre les études. Méta-risque positif, en hausse par rapport à l'analyse principale et quasi significatif.	MODERE
57	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	RECENTES	Méta-analyse de 7 études de cohortes dans 7 pays en Europe (6 cohortes nationales et 1 cohorte ville, pas de donnée française dans le cadre du projet ELAPSE. Association statistiquement significative mise en évidence avec une forte hétérogénéité entre les études (I <sup>2</sup> = 92 %). Données de registres utilisées donc population très large (n=28 153 138). Le modèle (Cox) a été ajusté sur plusieurs cofacteurs d'intérêt sauf IMC et tabac au niveau individuel (manquants pour la majorité des cohortes) donc un ajustement indirect a été fait. Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition à Abs à l'adresse de résidence. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux	FORT

											de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Fin de suivi : 2011-2017.	
58	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 57). Sous-groupe des populations (dans 7 cohortes) avec des concentrations moyennes annuelles $<3.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
59	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 57). Sous-groupe des populations (dans 7 cohortes) avec des concentrations moyennes annuelles $<2.5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
60	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 57). Sous-groupe des populations (dans 7 cohortes) avec des concentrations moyennes annuelles $<2.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
61	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 57). Sous-groupe des populations (dans 6 cohortes) avec des concentrations moyennes annuelles $<1,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
62	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 57). Sous-groupe des populations (dans 4 cohortes) avec des concentrations moyennes annuelles $<1.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à l'analyse principale mais n'atteint pas la significativité statistique donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
63	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse poolée de 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE (dont une cohorte française (E3N)). Standardisation des données de santé et d'exposition faite. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque, avec la classe de modèle SCHIF (modèle ensemble retenu ici). Association positive et statistiquement significative mise en évidence.	FORT
64	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 63). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $3.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat similaire l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE
65	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 63). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $2,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat similaire l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE
66	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 63). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $2.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à celui de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
67	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 63). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $1,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à celui de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et la cohorte française n'est plus incluse, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
68	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 63). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à $1.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à celui de l'analyse principale mais n'atteint pas la significativité statistique et seulement 3 cohortes concernées, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
69	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	ND	INTER-MEDIAIRES	Méta-analyse de 2 publications identifiées grâce à une revue de la littérature. Seules des publications incluant un ajustement sur la masse totale des PM <sub>2,5</sub> sont incluses dans la méta-analyse. Liste détaillée des études incluses non fournie par les auteurs, une prise de	FAIBLE

												contact a été faite pour récupérer ces informations. Les 2 études sont aux Etats-Unis, pas de localisation en Europe. Les résultats extraits ont été recalculés à partir des données envoyées (méta-risque positive et statistiquement significative). Hétérogénéité nulle entre les études. Pas d'information sur standardisation des données de santé mais supposée bonne car évènement de santé large et bien défini. Les métriques d'exposition BC et EC sont considérées dans la méta-analyse, sans conversion préalable par les auteurs.	
70	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Etude individuelle multicentrique, cohorte Gazel, France métropolitaine, 28 années de suivi, de 1989 à 2017. Population large (n=19 906). Association positive mais non statistiquement significative mise en évidence. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition (exploitation des modélisations carbone suie du projet ESCAPE puis back-extrapolation jusqu'au début du suivi). Bon niveau d'ajustement, y compris consommation de fruits et légumes. Imputation des données manquantes. Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation par une fonction <i>splines</i> à 2 degrés de liberté, mais non exploitable pour la construction d'une VTR car non monotone.	MODERE	
71	Mortalité toutes causes cardiovasculaires	Yang <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 22). Analyse statistique exploitant les résidus du modèle principal, d'intérêt pour différencier les effets du carbone suie de ceux des PM totaux en masse. Résultat positif et presque statistiquement significatif, confirmant le résultat de l'analyse principale. Mais résultat difficilement interprétable car exprimé pour une augmentation d'un incrément de résidus. Donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE	
<b>Santé respiratoire</b>													
72	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse multi-pays poolée, incluant 3 études de cohortes (Danemark et Suède) dans le cadre du projet ELAPSE. Population large (n=98 508 participants dont 4 928 cas). Deux pays du nord de l'Europe uniquement donc populations exposées à des niveaux de concentrations faibles (moyenne ± écart-type : 1,17 ± 0,41 10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> ). Standardisation des données (exposition et évènement de santé) entre cohortes. Cohérence globale des données de santé mais pas de précision sur la prise en compte ou non des bronchiectasies. Méta-risque supérieur à 1 et association statistiquement significative. Forme (non linéaire) de la relation caractérisée par les auteurs (fonctions <i>splines</i> ) bien que non exploitable pour dériver la VTR car non monotone.	FORT	
73	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 72). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE	
74	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 72). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE	
75	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 72). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE	
76	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 72). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non examinée, donc niveau d'intérêt moindre	MODERE	
77	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 72). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à l'analyse principale mais perte de la significativité statistique, donc niveau d'intérêt faible	FAIBLE	
78	Incidence de la BPCO	Liu <i>et al.</i> (2021b)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 72). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat fortement supérieur à l'analyse principale mais perte de la significativité statistique et uniquement 1 cohorte concernée, donc niveau d'intérêt faible	FAIBLE	

79	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Jacquemin <i>et al.</i> (2015)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTERMEDIAIRE	Méta analyse de 6 cohortes européennes (incluant françaises) dans le cadre du projet européen ESCAPE. Evaluation standardisée de l'exposition (Abs) entre cohortes par un modèle d'occupation des sols ( <i>land-use regression</i> ), avec de bonnes performances. Harmonisation de la définition de l'évènement de santé entre cohortes. Effet aléatoire sur localisation inclut dans la méta-analyse. Analyse principale uniquement disponible, pas d'analyse de sensibilité effectuée par les auteurs. Résultat non statistiquement significatif.	FAIBLE
80	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse multi-pays poolée de 3 cohortes, au Danemark et en Suède, dans le cadre du projet ELAPSE. Large population (98 326 participants dont 1 965 cas). Deux pays du nord de l'Europe uniquement, donc populations exposées à de faibles concentrations ambiantes (moyenne ± écart-type : 1,17 ± 0,41 10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> ). Standardisation des données d'exposition et d'évènement de santé entre cohortes. Méta-risque positif et statistiquement significatif, avec une caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation (fonctions splines). Le résultat est robuste à l'ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> mais pas sur le NO <sub>2</sub> .	MODERE
81	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
82	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	FAIBLE
83	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	FAIBLE
84	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche à l'analyse principale mais forme de la relation non examinée, donc niveau d'intérêt moindre	FAIBLE
85	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à celui de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre.	FAIBLE
86	Incidence de l'asthme chez l'adulte	Liu <i>et al.</i> (2021a)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 80). Sous-groupe des populations avec concentration moyenne annuelle inférieure à 0,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Absence d'association mise en évidence, forme de la relation non examinée et une seule cohorte concernée donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
87	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse faisant suite à une revue de la littérature et une évaluation du poids de la preuve (=confiance faible dans la présence d'une association pour EC). Dans la méta-analyse, 5 études incluses dont 3 en Europe (incl. Gehring <i>et al.</i> 2015). Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Définitions de l'évènement de santé cohérentes entre études, mais hétérogénéité sur fenêtre d'exposition : 4 études considèrent l'exposition à l'adresse de naissance et 1 étude (Canada) considère l'exposition de la mère pendant la grossesse. Cette dernière a été classée à fort risque de biais par les auteurs. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Méta-risque positif mais non significatif et hétérogénéité substantielle entre études (I <sup>2</sup> = 47 %) donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
88	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse de sensibilité à l'analyse principale (ligne 87). Ici, la méta-analyse n'inclut que les études à risque de biais faible ou modéré (i.e. excluant l'étude (Canada) présentant un risque de biais classé fort et une fenêtre d'expo différente des autres études). Méta-risque en augmentation par rapport à l'analyse principale et atteignant la significativité statistique.	MODERE

											bien que absence d'information sur l'hétérogénéité ( <i>a priori</i> attendue à la basse par rapport à l'analyse principale).	
89	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Bowatte <i>et al.</i> (2014)	PM Abs	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES	Méta-analyse de publications incluant 3 études : 1 étude en Europe et 2 études au Canada. Enfants jusqu'à 8 ans. Distinction faite entre asthme et sifflements pour éviter les biais de classification mais pas d'évaluation de la qualité des études, pas d'analyse de sensibilité et incohérences des définitions de l'asthme entre les études. Période de suivi <2010. Méta-risque positif et statistiquement significatif avec une hétérogénéité faible entre les études ( $I^2 = 19\%$ ). Il est à noter qu'une cohorte canadienne représente un poids important (75 %) dans la méta-analyse.	MODERE
90	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Gehring <i>et al.</i> (2015)	PM Abs	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES	Méta-analyse de cohortes en Europe, dans le cadre du projet MEDALL. Enfants de 0 à 16 ans. Large population (n=14 126). Beaucoup de facteurs de confusion pris en compte. Exposition estimée à l'adresse de naissance de manière standardisée entre les cohortes. Définitions différentes de l'asthme entre les cohortes et potentiel biais de classification aux âges les plus jeunes. Méta-risque supérieur à 1 et association statistiquement significative avec une faible hétérogénéité entre les cohortes. En analyse de sensibilité chez les enfants >4 ans, les résultats sont positifs et cohérents avec l'analyse principale. Le résultat principal est également confirmé en analyse poolée.	FORT
91	Incidence de l'asthme chez l'enfant	Khreis <i>et al.</i> (2017)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	NON	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES	Méta-analyse de publications faisant suite à une revue de la littérature. Une évaluation de la qualité des études a été faite par les auteurs au préalable de la méta-analyse. Dans la méta-analyse, 8 études de cohorte incluses (dont 6 en Europe, incluant Gehring <i>et al.</i> 2015). Enfants âgés de 5 à 14 ans. Méta-risque positif et statistiquement significatif, hétérogénéité faible entre les études (0 %). La définition de l'asthme est variable entre les études, avec possible inclusion des sifflements chez les plus jeunes. L'analyse spécifique des populations <6 ans montre une hétérogénéité augmentée ( $I^2 = 45\%$ ) et des résultats positifs mais non significatifs. Résultats globalement cohérents dans les analyses de sensibilité.	FORT
92	Mortalité pour cause BPCO	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse poolée de 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE (dont une cohorte française (E3N)). Standardisation des données de santé et d'exposition faite. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles (<3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque, avec la classe de modèle SCHIF (modèle ensemble retenu ici). Association positive et statistiquement significative mise en évidence.	FORT
93	Mortalité toutes causes respiratoires	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse faisant suite à une revue de la littérature et une évaluation du poids de la preuve (=confiance modérée dans la présence d'une association pour EC). Dans la méta-analyse, 8 études ont été incluses dont 6 en Europe. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Différentes modélisations de l'exposition dans les études : occupations des sols, dispersion et chimie-transport. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Méta-risque faible et non significatif. Trois études (Pays-Bas, Angleterre et Hong Kong) ont un poids important dans l'estimation combinée (entre 18 % et 40 %). Hétérogénéité entre études considérée modérée par les auteurs ( $I^2 = 64\%$ ).	FAIBLE
94	Mortalité toutes causes respiratoires	Boogaard <i>et al.</i> (2022) (UE)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse de sensibilité à l'analyse principale (ligne 93). Méta-analyse n'incluant que les 6 études en Europe (incluant 1 étude du projet ESCAPE). Méta-risque similaire à l'analyse principale, faible et non significatif, avec une hétérogénéité substantielle entre les études (58 %).	FAIBLE
95	Mortalité toutes causes respiratoires	Hvidtfeldt <i>et al.</i> (2019)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Etude individuelle multicentrique incluant deux villes danoises. Population large (n=49 564). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à	FAIBLE

											l'adresse de résidence. Suivi long de 1979 à 2015. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Pas d'association mise en évidence par les auteurs donc niveau d'intérêt faible.	
96	Mortalité toutes causes respiratoires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Méta-analyse de 4 études de cohortes dans 3 villes suédoises. Population large (n=68 679). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Estimation de l'exposition sur une période de 1 à 5 ans avant le décès. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Hétérogénéité forte ( $I^2 = 74\%$ ) entre les études. Méta-risque inférieur à 1, non statistiquement significatif, intervalle de confiance large.	FAIBLE
97	Mortalité toutes causes respiratoires	Nilsson Sommar <i>et al.</i> (2021)	BC	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 96). Estimation de l'exposition sur une période de 6 à 10 ans avant le décès. Hétérogénéité forte ( $I^2 = 84\%$ ) entre les études. Méta-risque inférieur à 1, non statistiquement significatif, intervalle de confiance large.	FAIBLE
98	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NON	RECENTES	Méta-analyse de 7 études de cohortes dans 7 pays en Europe (6 cohortes nationales et 1 cohorte ville, pas de données françaises) dans le cadre du projet ELAPSE. Association statistiquement significative mise en évidence avec une forte hétérogénéité entre les études ( $I^2 = 92\%$ ). Données de registres utilisées donc population très large (n=28 153 138). Le modèle (Cox) a été ajusté sur plusieurs cofacteurs d'intérêt sauf IMC et tabac au niveau individuel (manquants pour la majorité des cohortes) donc un ajustement indirect a été fait. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à Abs à l'adresse de résidence. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Fin de suivi : 2011-2017.	FORT
99	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 98). Sous-groupe de populations (7 cohortes) avec des concentrations $<3.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
100	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 98). Sous-groupe de populations (7 cohortes) avec des concentrations $<2,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
101	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 98). Sous-groupe de populations (7 cohortes) avec des concentrations $<2.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
102	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 98). Sous-groupe de populations (6 cohortes) avec des concentrations $<1,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à l'analyse principale mais forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt moindre.	MODERE
103	Mortalité toutes causes respiratoires	Stafoggia <i>et al.</i> (2022)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	ND	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 98). Sous-groupe de populations (4 cohortes) avec des concentrations $<1,5.10^{-5} m^{-1}$ . Résultat supérieur à l'analyse principale mais seulement 4 cohortes, forme de la relation non examinée et hétérogénéité non disponible donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
104	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse poolée de 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE (dont une cohorte française (E3N)). Standardisation des données de santé et d'exposition faite. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et	FORT

											risque, avec la classe de modèle SCHIF (modèle ensemble retenu ici). Association positive et statistiquement significative mise en évidence.	
105	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 104). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 3.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE
106	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 104). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat très proche de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE
107	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 104). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 2.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à celui de l'analyse principale mais forme de la relation non examinée donc niveau d'intérêt moindre	MODERE
108	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 104). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à celui de l'analyse principale mais n'atteint pas la significativité statistique donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
109	Mortalité toutes causes respiratoires	Strak <i>et al.</i> (2021)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	RECENTES	Analyse secondaire à l'analyse principale (ligne 104). Sous-groupe des études avec concentration moyenne annuelle inférieure à 1,5.10 <sup>-5</sup> m <sup>-1</sup> . Résultat supérieur à celui de l'analyse principale mais n'atteint pas la significativité statistique et seulement 3 cohortes concernées, donc niveau d'intérêt faible.	FAIBLE
110	Mortalité toutes causes respiratoires	Yang <i>et al.</i> (2019)	BC & EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	ND	INTER-MEDIAIRES	Méta-analyse de 2 publications identifiées grâce à une revue de la littérature. Seules des publications incluant un ajustement sur la masse totale des PM <sub>2,5</sub> sont incluses dans la méta-analyse. Liste détaillée des études incluses non fournie par les auteurs, une prise de contact a été faite pour récupérer ces informations. Les 2 études sont aux Etats-Unis, pas de localisation en Europe. Les résultats extraits ont été recalculés à partir des données envoyées (pas d'association mise en évidence). Hétérogénéité nulle entre les études. Pas d'information sur standardisation des données de santé mais supposée bonne car évènement de santé large et bien défini. Les métriques d'exposition BC et EC sont considérées dans la méta-analyse, sans conversion préalable par les auteurs.	FAIBLE
<b>Santé périnatale</b>												
111	Petit poids de naissance	Boogaard <i>et al.</i> (2022)	EC équivalent	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Méta-analyse faisant suite à une revue de la littérature et une évaluation du poids de la preuve (=confiance modérée dans la présence d'une association pour EC). Dans la méta-analyse, 5 études ont été incluses dont 2 en Europe (incl. Pedersen <i>et al.</i> 2013). Il est à noter que les 2 études européennes montrent des estimations de risques supérieures aux autres et des risques de biais moindres. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Méta-risque faible à la limite de la significativité statistique et hétérogénéité entre études faible (I <sup>2</sup> = 12%). Les résultats sont similaires dans les analyses de sensibilité menées par les auteurs.	MODERE
112	Petit poids de naissance	Brauer <i>et al.</i> (2008)	PM Abs	NON	OUI	NON	OUI	NON	NA	INTER-MEDIAIRES	Etude de cohorte au Canada, une seule ville. Evènement considéré : petit poids de naissance à terme. Fenêtre d'exposition (Abs) : grossesse entière (modèle d'occupation des sols avec une résolution fine mais des performances médiocres). Absence d'association observée par les auteurs.	FAIBLE
113	Petit poids de naissance	Gehring <i>et al.</i> (2014)	PM Abs	NON	OUI	NON	OUI	NON	NA	INTER-MEDIAIRES	Etude de cohorte au Canada, région de Vancouver. Utilisation d'une base de données administratives sur naissances 1999-2002. Evènement considéré : petit poids de naissance à terme. Fenêtre d'exposition (Abs) : grossesse entière. Estimation de l'exposition par modèle d'occupations des sols mais pas d'information sur les performances. Pas d'association mise en évidence et conclusion inchangée après ajustement sur le bruit.	FAIBLE
114	Petit poids de naissance	Kingsley <i>et al.</i> (2017)	BC fraction PM <sub>2,5</sub>	NON	OUI	NON	OUI	NON	NA	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Etude de cohorte aux Etats-Unis ( <i>Rhode Island</i> ). Période de suivi : 2002-2012. Fenêtre d'exposition : grossesse entière. Les concentrations en BC ont été modélisées à l'adresse	FAIBLE

											de résidence par un modèle d'occupation des sols ( <i>land-use regression</i> ). Pas d'association mise en évidence. Quand exposition mesurée sur site fixe (et non modélisée), pas d'association mise en évidence (0,81 [0,60-1,08]). Il est à noter que l'évènement considéré dans cette étude est le petit poids de naissance brut (avec un ajustement sur l'âge gestationnel dans le modèle), ce qui est difficilement comparables aux autres études - qui considèrent les naissances à terme.	
115	Petit poids de naissance	Pedersen <i>et al.</i> (2013)	PM <sub>2,5</sub> Abs	OUI	OUI	NON	OUI	OUI	NA	INTER-MEDIAIRES & RECENTES	Analyse poolée de 14 cohortes en Europe dans 12 pays, dans le cadre du projet ESCAPE. Population large (n=74 178). Prise en compte de plusieurs facteurs d'ajustement dans le modèle. Evaluation standardisée de l'exposition (concentrations annuelles en abs) selon modèle d'occupation des sols ( <i>land-use regression</i> ), avec de bonnes performances. Standardisation de la définition de l'évènement de santé entre cohortes : petit poids de naissance à terme. Fenêtre d'exposition : grossesse entière. Méta-risque supérieur à 1 à la limite de la significativité statistique.	MODERE
116	Petit poids de naissance	Sun <i>et al.</i> (2016)	EC fraction PM <sub>2,5</sub>	OUI	OUI	NON	OUI	NON	OUI	INTER-MEDIAIRES	Méta-analyse de publications (n=4), sans localisations européennes. Fenêtre d'exposition à EC : grossesse entière (selon tableau descriptif des auteurs). Evènement considéré : petit poids de naissance à terme. Résultat exprimé en % change, transformé ici en odds ratio. Pas d'évaluation de la qualité des publications. Hétérogénéité faible ente les études (25%). Méta-risque positif et statistiquement significatif.	MODERE

Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-level Air Pollution : a Study in Europe ; ESCAPE : European Study of Cohorts for Air Pollution Effects ; NA : non applicable ; ND : non disponible ; SCHIF : shape constrained health impact function. I<sup>2</sup> est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard. I<sup>2</sup> varie de 0 % (hétérogénéité nulle) à 100 % (forte hétérogénéité).

## **Annexe 8 : Extraction des fonctions concentration-risque et calcul des excès de risque vie entière pour les évènements de santé autres que la mortalité toutes causes pour dériver la VTR long terme**

Cette annexe décrit les fonctions concentration-risque extraites des publications retenues et le résultat graphique du calcul des excès de risque vie entière (ELR) en fonction d'une exposition à des concentrations moyennes annuelles de « carbone suie » (ou celle sur la période gestationnelle pour le faible poids de naissance) pour les évènements de santé suivants :

- pour la santé cardiovasculaire : incidence d'AVC, incidence de cardiopathies ischémiques, incidence d'évènements coronariens aigus, incidence d'infarctus du myocarde, mortalité toutes causes cardiovasculaires, mortalité par cardiopathie ischémique ;
- pour la santé respiratoire : incidence de l'asthme chez l'adulte, incidence de l'asthme chez l'enfant, incidence de la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), mortalité toutes causes respiratoires, mortalité de cause BPCO ;
- pour la santé périnatale : petit poids de naissance.

Le Tableau 41 (en page 226) décrit de manière synthétique les étapes menant à la dérivation des valeurs candidates (nombre de références identifiées, fonctions concentration-risque extraites, référence sélectionnée comme étude clé, approche utilisée pour la dérivation de l'ELR et données de santé utilisées pour caractériser le risque de fond).

Pour certains évènements de santé initialement retenus comme d'intérêt (cf. chapitre 7.1), seules les étapes d'extraction et de qualification du niveau d'intérêt ont été réalisées car :

- les fonctions concentration-risque pour ces évènements ont été qualifiées d'intérêt « faible » pour dériver une VTR : incidence de cardiopathies ischémiques ;
- une valeur candidate ne pouvait pas être dérivée en raison de l'indisponibilité ou de l'imprécision des données de santé nécessaires au calcul : incidence de la BPCO, incidence et/ou mortalité de maladies cardiovasculaires, incidence d'évènement coronariens aigus, incidence d'infarctus du myocarde ;
- une valeur candidate pour un évènement de santé similaire a été privilégiée car plus pertinente : mortalité pour causes cérébrovasculaires (l'incidence d'AVC et la mortalité pour causes cardiovasculaires ont été privilégiées).

Pour rappel, 23 publications ont été identifiées par nos recherches bibliographiques et examinaient l'exposition à long terme au « carbone suie » en lien avec l'un des évènements de santé d'intérêt.

## Incidence d'AVC

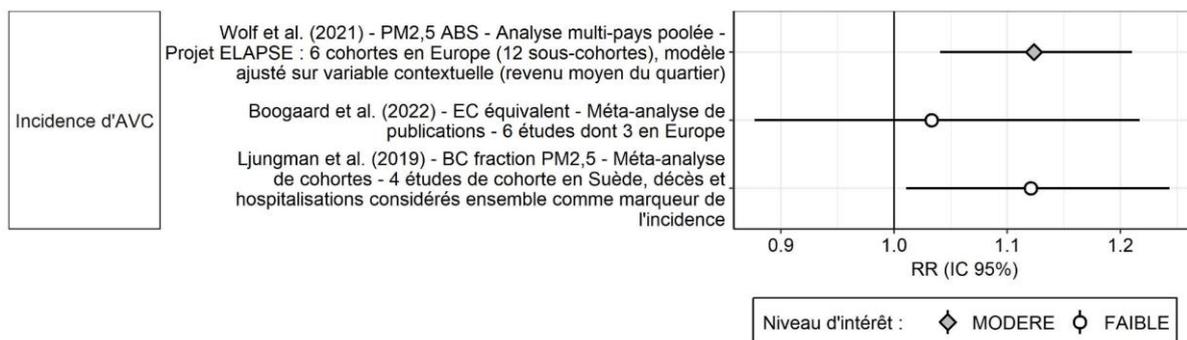
Trois publications traitant l'incidence d'AVC en lien avec l'exposition à long terme au « carbone suie » ont été identifiées et sont décrites dans le Tableau 29 (Boogaard *et al.* 2022; Ljungman *et al.* 2019; Wolf *et al.* 2021).

**Tableau 29. Description synthétique (par ordre alphabétique) des trois publications identifiées pour l'incidence d'AVC et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Incidence d'AVC	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications. Nombre d'études incluses : 6 études dont 3 européennes, identifiées par une revue systématique de la littérature. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Les études examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent EC a été effectuée avant la méta-analyse. Faible hétérogénéité entre études ( $I^2 = 16\%$ ).
	(Ljungman <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de cohortes. Nombre d'études incluses : 4 études de cohortes suédoises. Hospitalisation et décès sont considérés ensemble pour définir l'indicateur incidence d'AVC. Modèle de dispersion à haute résolution spatial basé sur des données locales d'émission (bonnes performances) Faibles concentrations de BC (valeurs moyennes pour l'ensemble des études : $0,76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Hétérogénéité nulle entre les cohortes dans la méta-analyse ( $I^2 = 0\%$ ).
	(Wolf <i>et al.</i> 2021)	Analyse multi-pays poolée. Nombre d'études incluses : 6 études de cohortes européennes dans le cadre du projet ELAPSE. Estimation de l'association ajustée sur tous les cofacteurs d'intérêt, y compris variables contextuelles (revenu moyen du quartier). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Analyses de sensibilité disponibles selon niveaux de concentrations décroissants. Incidence de l'AVC défini par couplage entre registres d'hôpital et registres de mortalité pour toutes les cohortes sauf Allemagne.

Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.

Au sein de ces trois publications, 10 fonctions concentration-risque ont été extraites. Les fonctions issues de résultats considérés principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 33 ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 7. Les estimations centrales de risque issues des analyses principales sont toutes supérieures à 1, bien qu'une association n'atteigne pas la significativité statistique.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

**Figure 33. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence d'AVC pour une augmentation de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

Parmi les fonctions concentration-risque extraites, le GT en a identifié une présentant un niveau d'intérêt « modéré » pour dériver une VTR issue de l'analyse principale de Wolf *et al.* (2021). Les autres fonctions présentent toutes un niveau d'intérêt « faible » pour dériver une

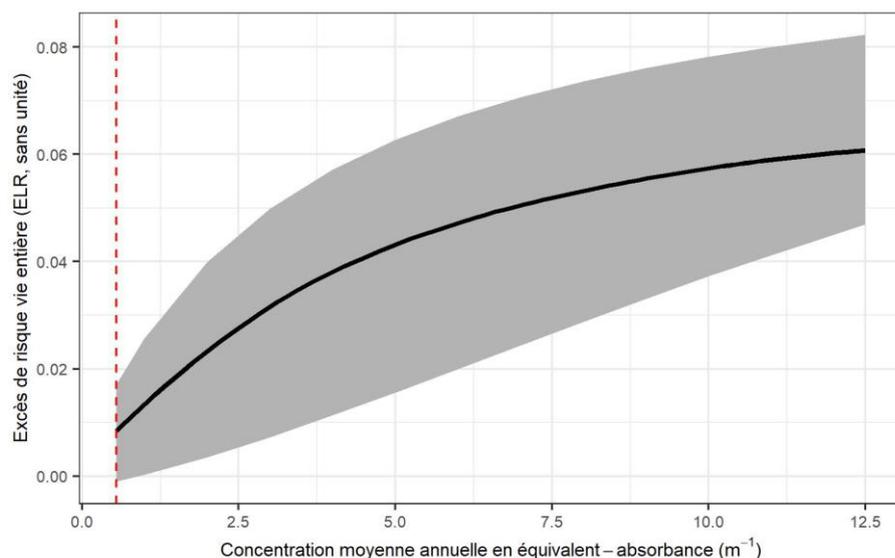
VTR en raison de l'absence de mise en évidence d'une association statistiquement significative (Boogard *et al.* 2022) et de la définition hétérogène de l'évènement de santé (couplant décès et hospitalisations), non reproductible sur des données de fond en France (Ljungman *et al.* 2019).

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à long terme au « carbone suie » et l'incidence d'AVC, le GT a retenu une fonction concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR, issue de Wolf *et al.* (2021).**

Cette fonction présente l'avantage i) de caractériser la forme non linéaire de la relation entre exposition au « carbone suie » et risque, avec un intérêt spécifique pour les populations exposées à de faibles concentrations ambiantes annuelles ( $\leq 3.10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ), ii) de considérer des cohortes européennes uniquement, permettant une bonne transposabilité de la fonction à la population française et iii) d'être jugée de bonne qualité par les experts du GT (en lien avec la standardisation des données individuelles entre cohortes, les degrés d'ajustement sur les facteurs de confusion et la modélisation sophistiquée de l'exposition).

Les données sur le risque de fond par classe d'âge sont disponibles pour l'incidence d'AVC. Ainsi, l'approche par table de survie décrementale a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet évènement de santé.

**L'ELR issu de l'utilisation de la fonction concentration-risque de Wolf *et al.* (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : incidence d'AVC. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont présentés dans la figure ci-dessous (Figure 34).**



**Figure 34. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'incidence d'AVC en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Wolf *et al.* (2021)**

*En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.*

## Incidence de cardiopathies ischémiques

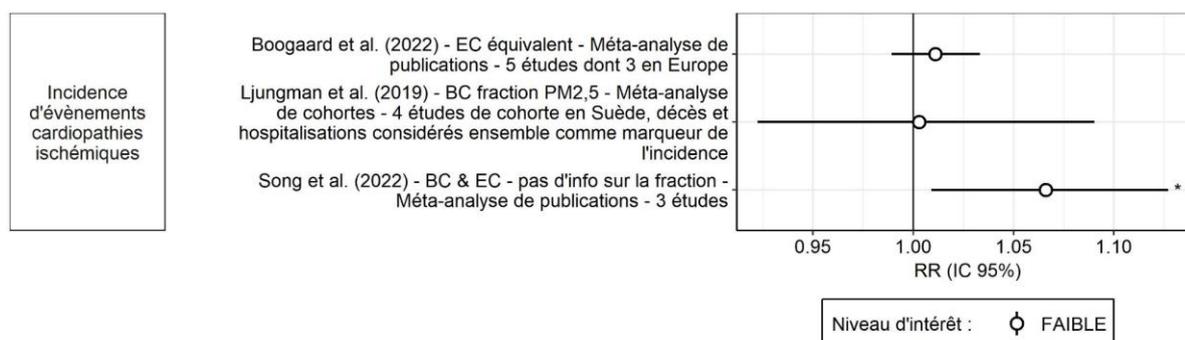
Trois publications, décrites dans le Tableau 30, examinent le lien entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et l'incidence de cardiopathies ischémiques (Boogaard *et al.* 2022; Ljungman *et al.* 2019; Song *et al.* 2022).

**Tableau 30. Description synthétique (par ordre alphabétique) des trois publications identifiées pour l'incidence de cardiopathie ischémique et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Incidence de cardiopathie ischémique	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications. Nombre d'études incluses : 5 études dont 3 européennes, identifiées grâce à une revue systématique de la littérature. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS, et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Hétérogénéité nulle ( $I^2 = 0\%$ ) entre les études.
	(Ljungman <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de cohortes. Nombre d'études incluses : 4 études de cohortes suédoises. Hospitalisation et décès sont considérés ensemble pour définir l'indicateur incidence de cardiopathie ischémique. Modèle de dispersion à haute résolution spatial basé sur des données locales d'émission (bonnes performances) Faibles concentrations en BC (valeurs moyennes pour l'ensemble des études : $0,76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Hétérogénéité nulle entre les études ( $I^2 = 0\%$ ).
	(Song <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications. Nombre d'études incluses : 3 études, identifiées suite à une revue de la littérature. Méta-risque significatif rapporté par les auteurs, mais pas de présentation du graphique et hétérogénéité non disponible. Pas d'information donnée par les auteurs sur les 3 études incluses donc i) incertitudes sur la définition de l'évènement de santé (mortalité et/ou morbidité), ii) incertitudes sur les métriques considérées et ii) incertitudes sur les localisations (Europe ou non).

Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.

Au sein de ces trois publications, trois fonctions concentration-risque issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT ont été extraites (Figure 35). Les estimations centrales du risque sont toutes supérieures à 1 mais seule l'association issue de la méta-analyse de Song *et al.* (2022) est statistiquement significative.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \cdot 10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. \* Les risques n'ont pas pu être convertis en équivalent-abs car un mélange de métriques était utilisé par les auteurs, sans possibilité de transformation ; le risque est alors exprimé pour un incrément de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire.

**Figure 35. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de cardiopathies ischémiques pour une augmentation de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

Ces trois fonctions concentration-risque sont déterminées comme de niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR en raison de i) la faible amplitude du méta-risque estimé et du manque de significativité statistique (Boogaard *et al.* 2022 ; Ljungman *et al.* 2019) et ii) la présence de nombreuses incertitudes sur les études incluses dans la méta-analyse (Song *et al.* 2022).

Le GT n'a pas dérivé de valeur candidate à la VTR pour l'incidence de cardiopathies ischémiques car aucune des fonctions concentration-risque identifiées n'est d'intérêt suffisant.

### Incidence d'évènements coronariens aigus

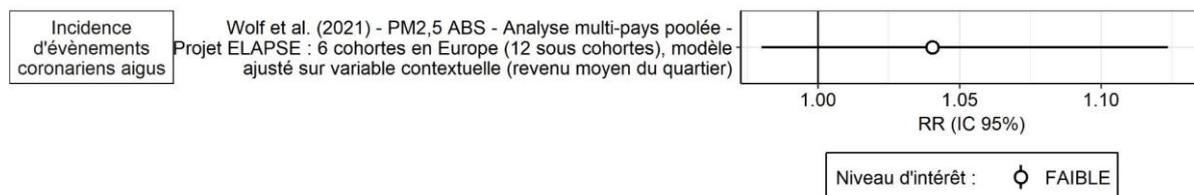
Une unique publication a été identifiée pour cet évènement de santé (Wolf *et al.* 2021). Elle est décrite de manière synthétique dans le Tableau 31.

Tableau 31. Description synthétique de la publication identifiée pour l'incidence d'évènements coronariens aigus et l'exposition à long terme au « carbone suie »

	Publication	Type d'analyse et description
Incidence d'évènements coronariens aigus	(Wolf <i>et al.</i> 2021)	Analyse multi-pays poolée. Nombre d'études incluses : 6 études de cohortes européennes au sein du projet ELAPSE. Population large (1n=0 071 cas). Caractérisation de la forme non linéaire de la relation entre la concentration en PM <sub>2,5</sub> Abs et le risque d'évènements coronariens aigus dans l'analyse considérée comme principale par les auteurs (avec un ajustement sur différentes variables dont contextuelles). Les analyses secondaires incluent un modèle non ajusté sur la variable contextuelle et des analyses en sous-groupes avec des concentrations décroissantes en PM <sub>2,5</sub> Abs. Incidence définie par couplage entre registres de sortie d'hôpital et registres de décès pour toutes les cohortes sauf Allemagne

Abs : absorbance ; CIM : classification internationale des maladies ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

Dans cette publication, huit fonctions concentration-risque ont été extraites. Celle issue du résultat considéré comme principal par les auteurs et/ou le GT est présentée dans la Figure 36 ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 7. L'estimation centrale du risque issue de l'analyse principale est de 1,04 mais l'association n'est pas statistiquement significative. Les résultats issus des analyses secondaires sont du même ordre de grandeur et n'atteignent pas non plus la significativité statistique. Wolf *et al.* (2021) ont caractérisé la forme non linéaire de la relation en exploitant la classe de modèles SCHIF (*shape constrained health impact function*).



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \cdot 10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

Figure 36. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence d'évènements coronariens aigus pour une augmentation de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance

Cette fonction concentration-risque est déterminée comme de niveau d'intérêt « faible » pour dériver une VTR car elle n'atteint pas la significativité statistique et la définition de l'évènement de santé est hétérogène (couplant registres de sorties d'hôpital et registres de décès) et non reproductible sur des données de fond en France. Les résultats issus des analyses secondaires sont également considérés d'intérêt « faible ».

Le GT n'a pas dérivé de valeur candidate à la VTR. Seules les étapes d'extraction et de qualification du niveau d'intérêt ont été réalisées pour cet évènement de santé en raison de l'indisponibilité de données de fond cohérentes avec la définition utilisée par les auteurs.

### ***Incidence d'infarctus du myocarde***

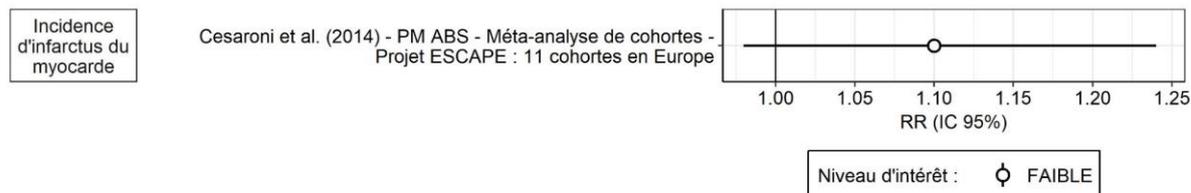
Une seule publication, décrite de manière synthétique dans le Tableau 32, a été identifiée pour cet évènement de santé (Cesaroni *et al.* 2014).

**Tableau 32. Description synthétique de la publication identifiée pour l'incidence d'infarctus du myocarde et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Incidence infarctus du myocarde	(Cesaroni <i>et al.</i> 2014)	Méta-analyse de cohortes Nombre d'études incluses : 11 études de cohortes européennes dans le cadre du projet ESCAPE. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à PM <sub>2,5</sub> Abs à l'adresse de résidence. Registres des hôpitaux et registres de décès ont été combinés pour estimer l'incidence d'infarctus du myocarde. Estimation centrale du méta-risque supérieure à 1 mais association non statistiquement significative.

Abs : absorbance ; ESCAPE : *Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe*.

Dans cette publication, une seule fonction concentration-risque, issue du résultat considéré comme principal par les auteurs et/ou le GT, a été extraite (Figure 37). L'estimation centrale du méta-risque est supérieure à 1 mais l'association n'est pas statistiquement significative. Cette fonction concentration-risque est déterminée par le GT comme de niveau d'intérêt « faible » car elle n'atteint pas la significativité statistique et la définition de l'évènement de santé est hétérogène (couplant registres d'hôpitaux et registres de décès) et non reproductible sur des données de fond en France.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; ESCAPE : *Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe*.

**Figure 37. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence d'infarctus du myocarde pour une augmentation de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

Le GT n'a pas dérivé de valeur candidate à la VTR. Seules les étapes d'extraction et de qualification du niveau d'intérêt ont été réalisées pour cet évènement de santé en raison de l'indisponibilité de données de fond cohérentes avec la définition utilisée par les auteurs

### ***Mortalité toutes causes cardiovasculaires***

Sept publications, décrites de manière synthétique dans le Tableau 33, examinent le lien entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et la mortalité toutes causes cardiovasculaires

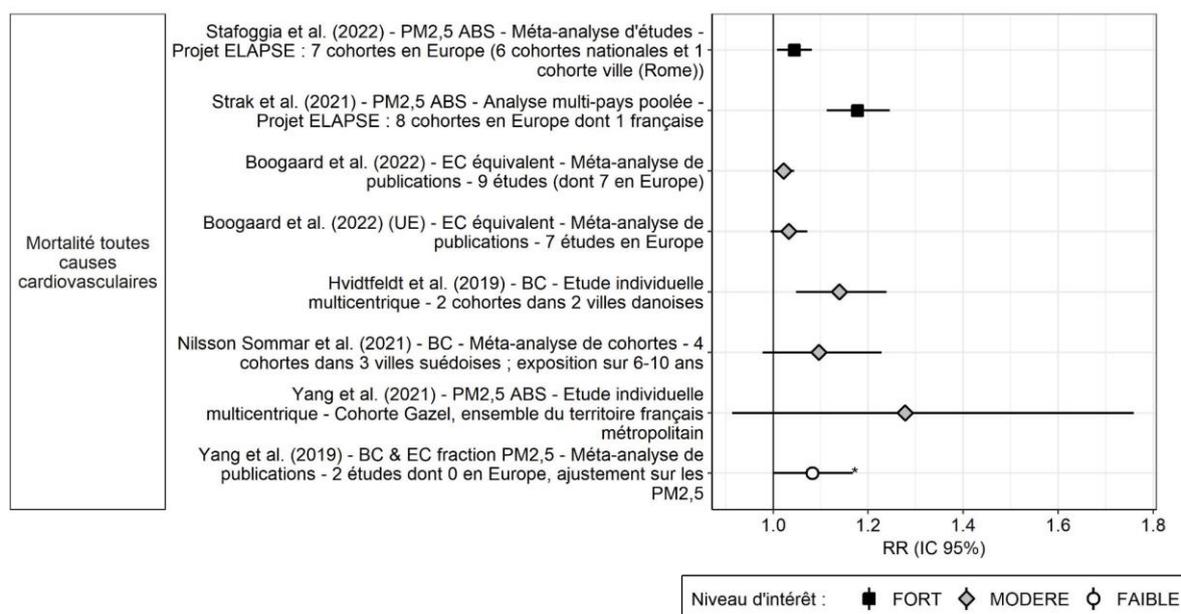
(Boogaard *et al.* 2022; Hvidtfeldt *et al.* 2019; Nilsson Sommar *et al.* 2021; Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021; Yang *et al.* 2019).

**Tableau 33. Description synthétique (par ordre alphabétique) des sept publications identifiées pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 9 études dont 7 européennes (incluant 1 étude du projet ESCAPE), identifiées grâce à une revue systématique de la littérature. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Période de suivi mixte : quelques études <2010. Hétérogénéité modérée ( $I^2 = 69\%$ ).
	(Hvidtfeldt <i>et al.</i> 2019)	Analyse multicentrique Etude individuelle multicentrique incluant deux villes danoises. Population large (n=49 564). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Suivi long de 1979 à 2015. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Intérêt particulier des auteurs pour le rôle du bruit comme facteur de confusion de l'association entre pollution atmosphérique et santé.
	(Nilsson Sommar <i>et al.</i> 2021)	Méta-analyse de cohortes Nombre d'études incluses : 4 études dans 3 villes suédoises. Population large (n=68 679). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Absence d'hétérogénéité entre les études ( $I^2 = 0\%$ ).
	(Stafoggia <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de cohortes Nombre d'études incluses : 7 études européennes dans 7 pays, au sein du projet ELAPSE. Très forte hétérogénéité entre les études pour cet événement de santé ( $I^2 = 91,2\%$ ). Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à Abs à l'adresse de résidence. Données de registres utilisées donc population très large (n=28 153 138). Standardisation des données entre pays.
	(Strak <i>et al.</i> 2021)	Analyse multi-pays poolée Nombre d'études incluses : 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE, dont 1 cohorte française. Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque dans l'analyse principale. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition avec de bonnes performances (diminution attendue du risque de biais de classification).
	(Yang <i>et al.</i> 2021)	Analyse multicentrique Etude individuelle multicentrique en France (cohorte Gazel). Long suivi des participants (1989-2017). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration (abs) et risque. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition. Nombreux facteurs de confusion pris en compte. Une analyse spécifique a été menée pour tenter de différencier les effets de la fraction carbonée de ceux des PM totaux.
	(Yang <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 2 études identifiées grâce à une revue de la littérature. Seuls les résultats incluant un ajustement sur les PM <sub>2,5</sub> en masse sont inclus dans la méta-analyse. Les études incluses dans la méta-analyses examinent les métriques EC et BC ; les auteurs n'ont pas appliqué de conversion. Hétérogénéité entre les études non disponible.

Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ESCAPE : European Study of Cohorts for Air Pollution Effects ; Gazel : cohorte de volontaires d'Electricité de France et de Gaz de France.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.

Au sein de ces sept publications, 21 fonctions concentration-risque ont été extraites. Les fonctions issues de résultats considérés principaux par les auteurs et/ou le GT sont visibles dans la Figure 38 ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 7.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. \* Les risques n'ont pas pu être convertis en équivalent-abs car un mélange de métriques était utilisé par les auteurs, sans possibilité de transformation ; le risque est alors exprimé pour un incrément de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; Gazel : cohorte composée de volontaires d'Electricité de France et de Gaz de France.

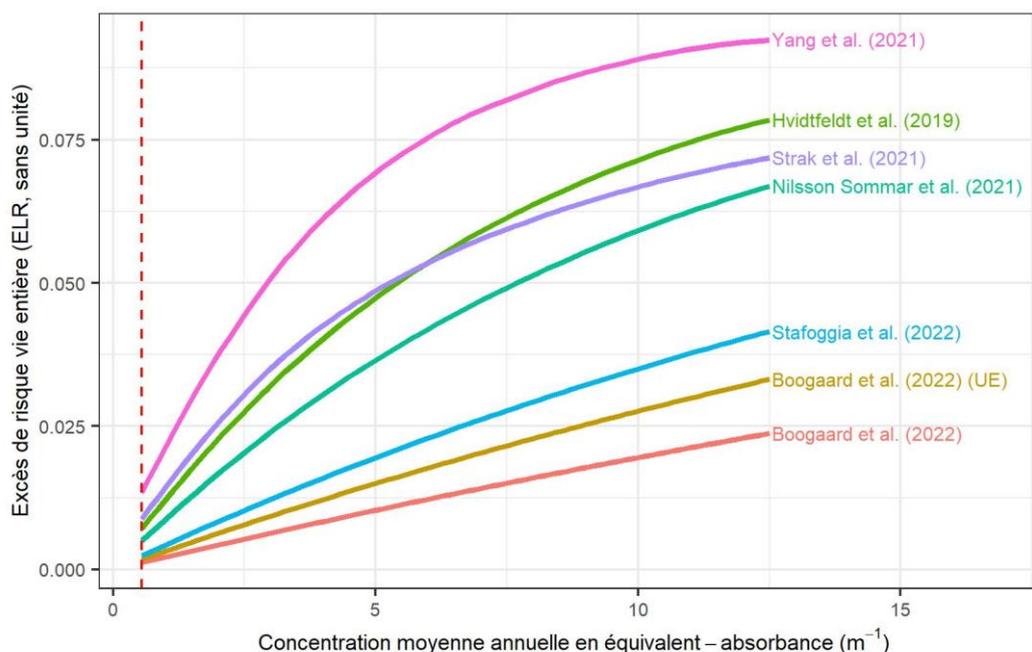
**Figure 38. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès de causes cardiovasculaires pour une augmentation de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

Les estimations centrales du risque issues des analyses principales sont toutes supérieures à 1 avec des valeurs comprises entre 1,02 et 1,28, bien que certaines associations ne soient pas statistiquement significatives. Les études de Strak *et al.* (2021) et de Yang *et al.* (2021) ont caractérisé la forme non linéaire de la relation entre la concentration en absorbance et le risque de mortalité toutes causes cardiovasculaires en exploitant, respectivement, la classe de modèles SCHIF (*shape constrained health impact function*) et une fonction *spline* cubique incluant 2 degrés de liberté.

Parmi les fonctions concentration-risque extraites, deux fonctions ont été déterminées par le GT comme de niveau d'intérêt « fort » pour la dérivation d'une VTR, cinq fonctions ont été déterminées comme de niveau d'intérêt « modéré ». Les autres fonctions sont considérées d'intérêt « faible ».

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à long terme au « carbone suie » et l'incidence d'AVC, le GT a retenu 7 fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR. Elles sont issues de six publications (Boogaard *et al.* 2022; Hvidtfeldt *et al.* 2019; Nilsson Sommar *et al.* 2021; Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2021).**

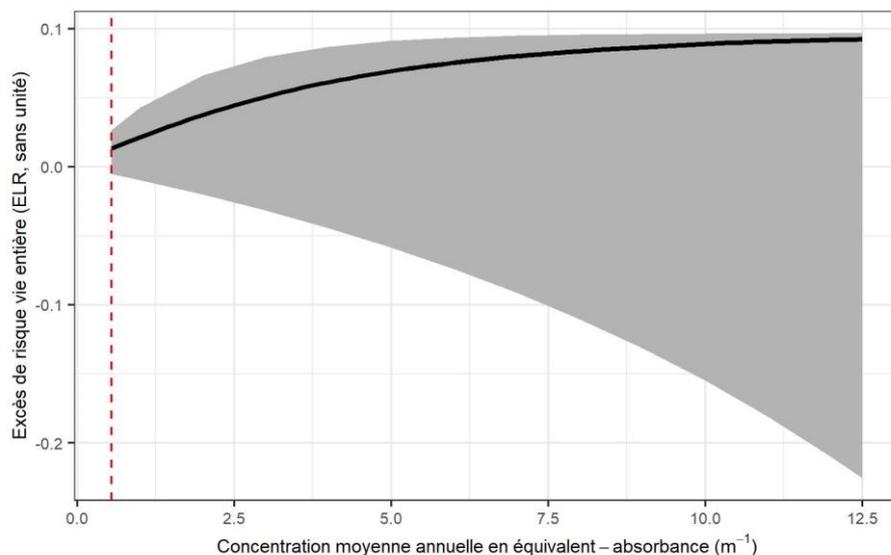
Les données sur le risque de fond par classe d'âge sont disponibles pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires. Ainsi, l'approche par table de survie décrémente a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet événement de santé. Les valeurs de l'ELR pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires obtenues à partir des sept fonctions concentration-risque retenues sont présentées dans la Figure 39.



**Figure 39. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

L'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de l'étude de Yang *et al.* (2021) est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. La forme non linéaire de la relation entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et le risque de mortalité toutes causes cardiovasculaires y est en outre incluse. La publication de Yang *et al.* (2021) présente l'avantage de se baser sur les données d'une cohorte française (Gazel). Cette analyse est également considérée comme de bonne qualité par les experts du GT en raison de la prise en compte de plusieurs facteurs de confusion ainsi que de la modélisation sophistiquée de l'exposition (résolution spatiale et temporelle fine et bonnes performances). De plus, une analyse spécifique a été menée pour tenter de différencier les effets de l'absorbance de ceux des PM en masse sur le risque.

**Compte tenu de ces éléments, l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Yang *et al.* (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité toutes causes cardiovasculaires. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 40.**



**Figure 40. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité toutes causes cardiovasculaires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Yang *et al.* (2021)**

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

### Mortalité par cardiopathie ischémique

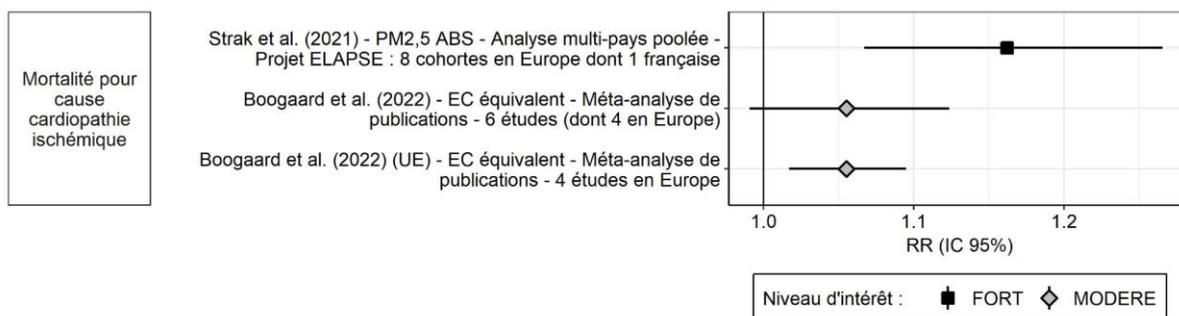
Deux publications, décrites de manière synthétique dans le Tableau 34, ont été identifiées sur l'exposition à long terme au « carbone suie » et la mortalité par cardiopathie ischémique (Boogaard *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021).

**Tableau 34. Description synthétique (par ordre alphabétique) des deux publications identifiées pour la mortalité par cardiopathie ischémique et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Mortalité par cardiopathie ischémique	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 6 études dont 4 européennes (incluant une étude du projet ESCAPE), identifiées grâce à une revue systématique de la littérature. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Période de suivi mixte : quelques études <2010. Méta-risque à la limite de la significativité statistique, hétérogénéité élevée ( $I^2 = 76\%$ ). Poids important (27-30 %) d'une étude à Hong Kong et d'une étude à Rome dans la méta-analyse. L'analyse de sensibilité incluant uniquement les études européennes confirme les résultats de l'analyse principale.
	(Strak <i>et al.</i> 2021)	Analyse multi-pays poolée Nombre d'études incluses : 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE, dont 1 cohorte française (cohorte E3N). Standardisation des données de santé et d'exposition. Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque dans l'analyse principale. Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition, bonne performances (diminution attendue du risque de biais de classification).

Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; E3N : Etude Epidémiologique auprès de femmes de la MGEN ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ESCAPE : European Study of Cohorts for Air Pollution Effects.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard

Au sein de ces deux publications, 3 fonctions concentration-risque, issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT ont été extraites (Figure 41). Les estimations centrales de risque sont toutes supérieures à 1, avec des valeurs comprises entre 1,08 et 1,27, mais l'association issue de l'analyse principale Boogaard *et al.* (2022) n'est pas statistiquement significative. Strak *et al.* (2021) ont caractérisé la forme non linéaire de la relation entre la concentration en absorbance et le risque de mortalité par cardiopathie ischémique en exploitant la classe de modèles SCHIF (*shape constrained health impact function*).



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

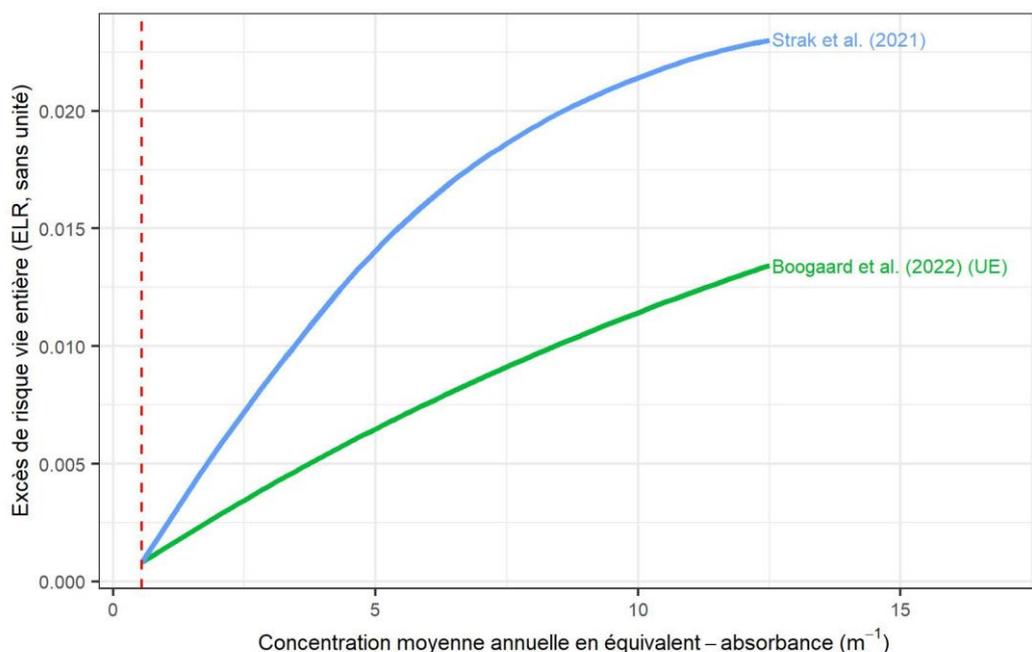
**Figure 41. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès pour cause cardiopathie ischémique pour une augmentation de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

La fonction concentration-risque issue de Strak *et al.* (2021) a été déterminée par le GT comme de niveau d'intérêt « fort » pour la dérivation d'une VTR, tandis que les deux fonctions issues de Boogaard *et al.* (2022) ont été déterminées comme de niveau d'intérêt « modéré ». Parmi les deux fonctions extraites de Boogaard *et al.* (2022), celle issue de l'analyse secondaire n'incluant que des localisations européennes a été privilégiée par la suite car elle est supposée plus représentative de la population cible (française) et présente un intervalle de confiance plus réduit autour de l'estimation centrale du risque.

**Ainsi, au regard des données disponibles pour l'exposition à long terme au « carbone suie » et la mortalité par cardiopathie ischémique, le GT a retenu 2 fonctions concentration-risque avec un intérêt suffisant (i.e. *a minima* « modéré ») pour dériver une VTR, issues de deux publications (Boogaard *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021).**

Les données sur le risque de fond par classe d'âge sont disponibles pour la mortalité par cardiopathie ischémique. Ainsi, l'approche par table de survie décroissante a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet évènement de santé.

Les valeurs de l'ELR pour la mortalité par cardiopathie ischémique obtenues à partir des deux fonctions concentration-risque retenues à l'étape précédente sont présentées dans la Figure 42.



**Figure 42. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité de cause cardiopathie ischémique en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

L'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de l'étude de Strak *et al.* (2021) est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. La forme non linéaire de la relation entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et le risque de mortalité par cardiopathie ischémique y est en outre incluse. L'analyse de Strak *et al.* (2021) présente l'avantage de ne considérer que des cohortes européennes, permettant la bonne transposabilité de la fonction concentration-risque à la population française. Cette analyse est considérée de bonne qualité par les experts du GT grâce à la standardisation des données individuelles de santé et d'exposition entre cohortes ainsi que la modélisation sophistiquée de l'exposition (résolution spatiale et temporelle fine et bonnes performances).

**Ainsi, compte tenu de ces éléments, l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité par cardiopathie ischémique. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 43.**

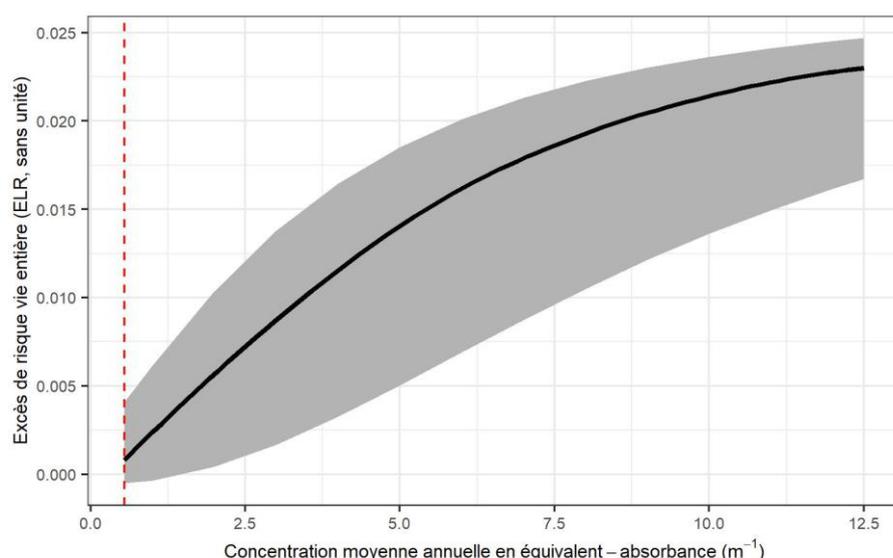


Figure 43. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité de cause cardiopathie ischémique en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021)

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

### Incidence de l'asthme chez l'adulte

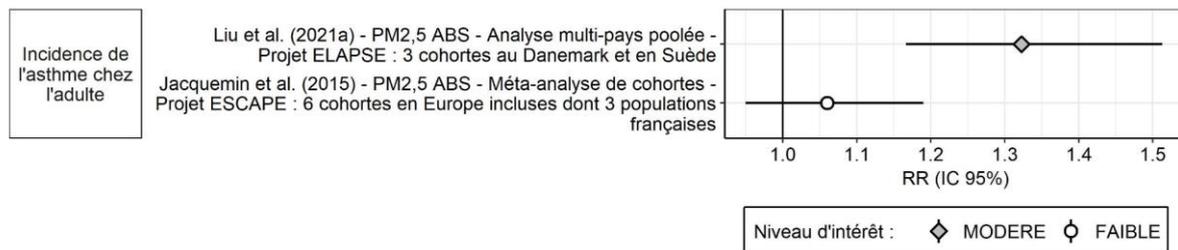
Deux publications, décrites dans le Tableau 35, examinent le lien entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et l'incidence de l'asthme chez l'adulte (Jacquemin *et al.* 2015; Liu *et al.* 2021a).

Tableau 35. Description synthétique (par ordre alphabétique) des deux publications identifiées pour l'incidence de l'asthme chez l'adulte et l'exposition à long terme au « carbone suie »

	Publication	Type d'analyse et description
Incidence de l'asthme chez l'adulte	(Jacquemin <i>et al.</i> 2015)	Méta-analyse d'études Nombre d'études : 6 études de cohorte européennes (dont une cohorte française) au sein du projet ESCAPE. Evaluation standardisée de l'exposition (concentrations annuelles en Abs) selon modèle d'occupation des sols ( <i>land-use regression</i> ), avec de bonnes performances. Harmonisation de la définition de l'évènement de santé entre cohortes. Uniquement analyse principale disponible, pas d'analyse de sensibilité effectuée par les auteurs. Forme de la relation non caractérisée et résultat non statistiquement significatif.
	(Liu <i>et al.</i> 2021a)	Analyse multi-pays poolée Nombre d'études : 3 études de cohortes européennes au sein du projet ELAPSE. Très large population (n=98 326 dont 1 965 cas). Deux pays du nord de l'Europe (Danemark et Suède) uniquement, population exposée à de faibles concentrations ambiantes (moyenne $\pm$ écart-type : $1,17 \pm 0,41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ). Standardisation des données d'exposition et d'évènement de santé. Caractérisation de la forme de la relation disponible (splines) pour l'analyse principale mais pas pour les analyses secondaires (sous-groupes avec des concentrations ambiantes décroissantes). Suivi récent. Résultat robuste à l'ajustement sur PM <sub>2,5</sub> mais pas sur NO <sub>2</sub> .

Abs : absorbance ; ELAPSE : *Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe* ; ESCAPE : *European Study of Cohorts for Air Pollution Effects*.

Au sein de ces deux publications, huit fonctions concentration-risque ont été extraites. Les deux fonctions issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT sont présentées dans la Figure 44 ; la liste complète des fonctions est visible en Annexe 7. Les estimations centrales issues des analyses principales sont toutes deux supérieures à 1, avec une valeur de 1,06 pour Jacquemin *et al.* (2015) et de 1,32 pour Liu *et al.* (2021a). Liu *et al.* ont caractérisé la forme non linéaire de la relation entre la concentration et le risque d'incidence de l'asthme chez l'adulte en exploitant une fonction *spline* cubique incluant 3 degrés de liberté.



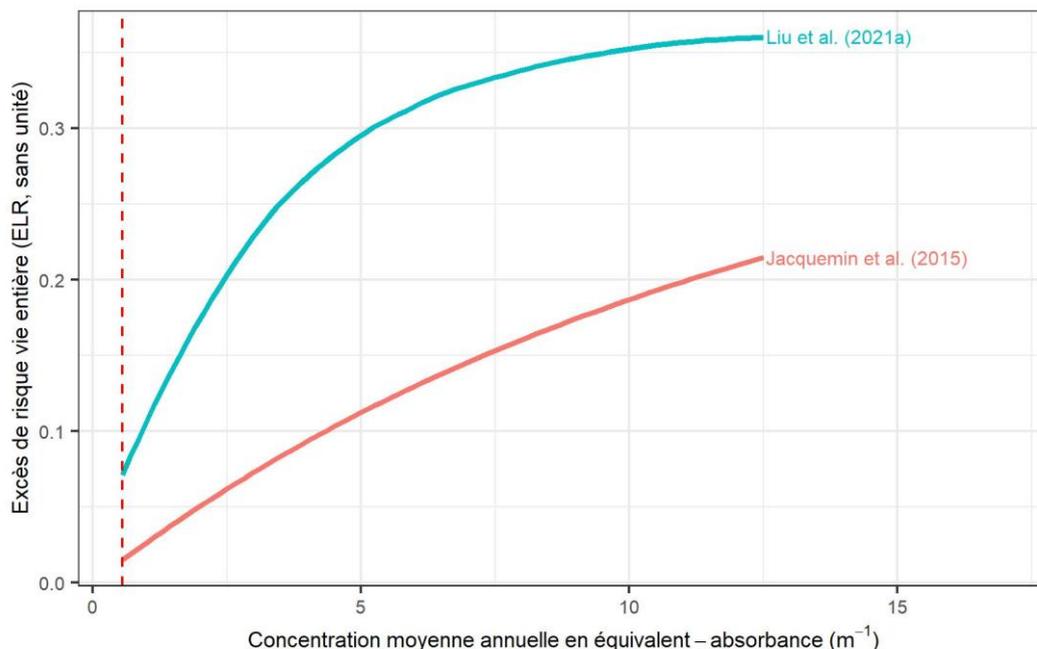
Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ESCAPE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

**Figure 44. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de l'asthme chez l'adulte pour une augmentation de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

La fonction concentration-risque issue de l'étude Liu *et al.* (2021a) a été déterminée par le GT comme de niveau d'intérêt « modéré » pour la dérivation d'une VTR, tandis que la fonction issue de Jacquemin *et al.* (2015) a été déterminée comme de niveau d'intérêt « faible » (en raison de son manque de significativité statistique). Les fonctions issues des analyses secondaires de Liu *et al.* (2021a) ont été déterminées comme d'intérêt « faible ».

**Au regard de ces données sur l'exposition à long terme au « carbone suie » et l'incidence de l'asthme chez l'adulte, le GT a retenu une fonction concentration-risque avec un niveau d'intérêt suffisant (a minima « modéré ») issue de Liu *et al.* (2021a).**

Les données sur le risque de fond par classe d'âge sont disponibles pour l'incidence de l'asthme chez l'adulte. Ainsi, l'approche par table de survie décrementale a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet évènement de santé. Les valeurs de l'ELR pour l'incidence de l'asthme chez l'adulte obtenue à partir des deux fonctions concentration-risque retenues à l'étape précédente sont présentées dans la Figure 45.

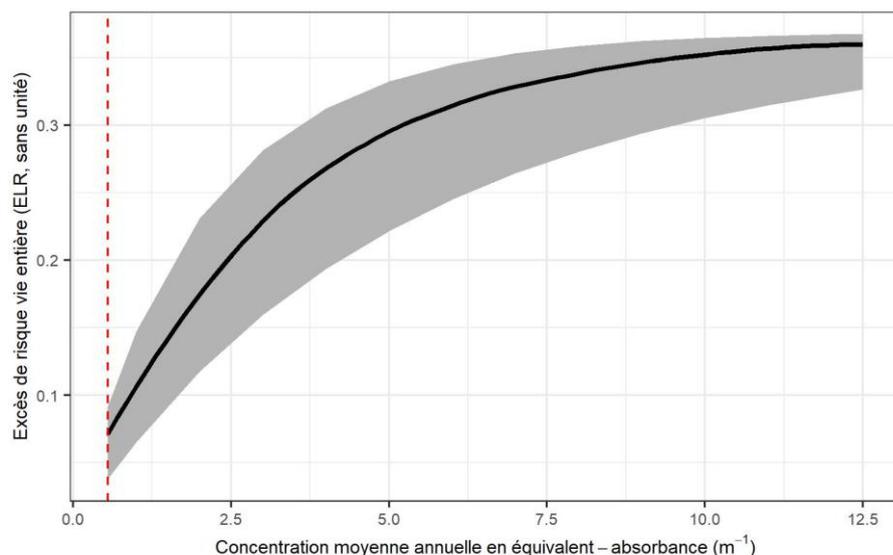


**Figure 45. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) d'incidence de l'asthme chez l'adulte en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

L'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de l'étude de Liu *et al.* (2021a) est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. La forme non linéaire de la relation entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et le risque

d'incidence de l'asthme chez l'adulte y est incluse. Bien que l'analyse de Liu *et al.* (2021a) n'inclut pas de population française, elle porte sur une large population en Europe améliorant la transposabilité de la fonction concentration-risque à la population cible (française). Enfin, cette analyse est considérée de bonne qualité par les experts du GT grâce à la standardisation des données individuelles entre cohortes, la modélisation sophistiquée de l'exposition (résolution spatiale et temporelle fine et bonnes performances), la robustesse des résultats après ajustement sur les PM<sub>2,5</sub> et le suivi récent des cohortes.

**Ainsi, compte tenu de ces éléments, l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Liu *et al.* (2021a) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : incidence de l'asthme chez l'adulte. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 46.**



**Figure 46. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'incidence de l'asthme chez l'adulte en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Liu *et al.* (2021a)**

*En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.*

### Incidence de l'asthme chez l'enfant

Quatre publications, décrites de manière synthétique dans le Tableau 36 examinent le lien entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et l'incidence de l'asthme chez l'enfant (Boogaard *et al.* 2022; Bowatte *et al.* 2015; Gehring *et al.* 2015; Khreis *et al.* 2017).

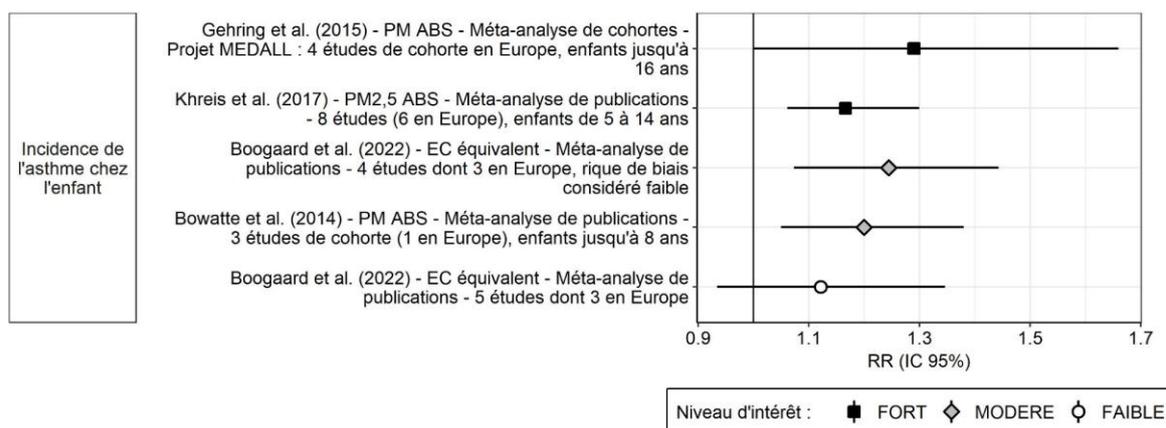
**Tableau 36. Description synthétique (par ordre alphabétique) des quatre publications identifiées pour l'incidence de l'asthme chez l'enfant et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Incidence de l'asthme chez l'enfant	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 5 études dont 8 européennes, identifiées grâce à une revue systématique de la littérature. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. L'analyse de sensibilité incluant les études à risque de biais faible à modéré uniquement (n=4) confirme les résultats obtenus dans l'analyse principale. Cohérence des données de santé mais hétérogénéité sur la fenêtre d'exposition. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Hétérogénéité substantielle entre les études (I <sup>2</sup> = 47 %)
	(Bowatte <i>et al.</i> 2015)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 3 études de cohorte (dont 1 européenne), enfants jusqu'à 8 ans. Distinction faite entre asthme et sifflements pour éviter les biais de classification. Pas d'évaluation de la qualité des études, pas d'analyses de sensibilité proposées et définition de l'asthme variable entre les études incluses. Hétérogénéité faible (I <sup>2</sup> = 19,3 %), mais une cohorte canadienne représente un poids important de 75 % dans la méta-analyse.

Publication	Type d'analyse et description
(Gehring <i>et al.</i> 2015)	Méta-analyse de cohortes Nombre d'études incluses : 4 études de cohorte européennes (projet MEDALL) d'enfants âgés jusqu'à 16 ans. Large population (n=14 126), modélisation de l'exposition à l'adresse de naissance standardisée entre les cohortes. Beaucoup de facteurs de confusion pris en compte. Définitions différentes de l'asthme entre les cohortes et potentiel biais de classification aux âges les plus jeunes (attendu non différentiel). En analyse de sensibilité chez les enfants >4 ans, les résultats sont positifs et cohérents avec l'analyse principale. Le résultat principal est également confirmé en analyse poolée.
(Khreis <i>et al.</i> 2017)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 8 études de cohorte (dont 6 européennes, incluant Gehring <i>et al.</i> 2015), enfants âgés de 5 à 14 ans. Hétérogénéité nulle ( $I^2 = 0\%$ ). Les études ont été identifiées grâce à une revue de la littérature, une évaluation de la qualité des études a été faite par les auteurs. Définition de l'asthme variable entre les études, avec possible inclusion des sifflements chez les plus jeunes : hétérogénéité augmentée ( $I^2 = 45\%$ ) et résultats non significatifs chez les populations <6 ans. Résultats globalement cohérents dans les analyses de sensibilité.

*Abs* : absorbance ; *BC* : carbone suie ; *BS* : fumées noires ; *EC* : carbone élémentaire ; *MEDALL* : *mechanisms of the development of allergy project*.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard

Au sein de ces quatre publications, cinq fonctions concentration-risque issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT ont été extraites (Figure 47). Les estimations centrales du risque sont toutes supérieures à 1, avec des valeurs comprises entre 1,11 et 1,29, même si l'association issue de l'analyse principale de Boogaard *et al.* (2022) n'est pas statistiquement significative.



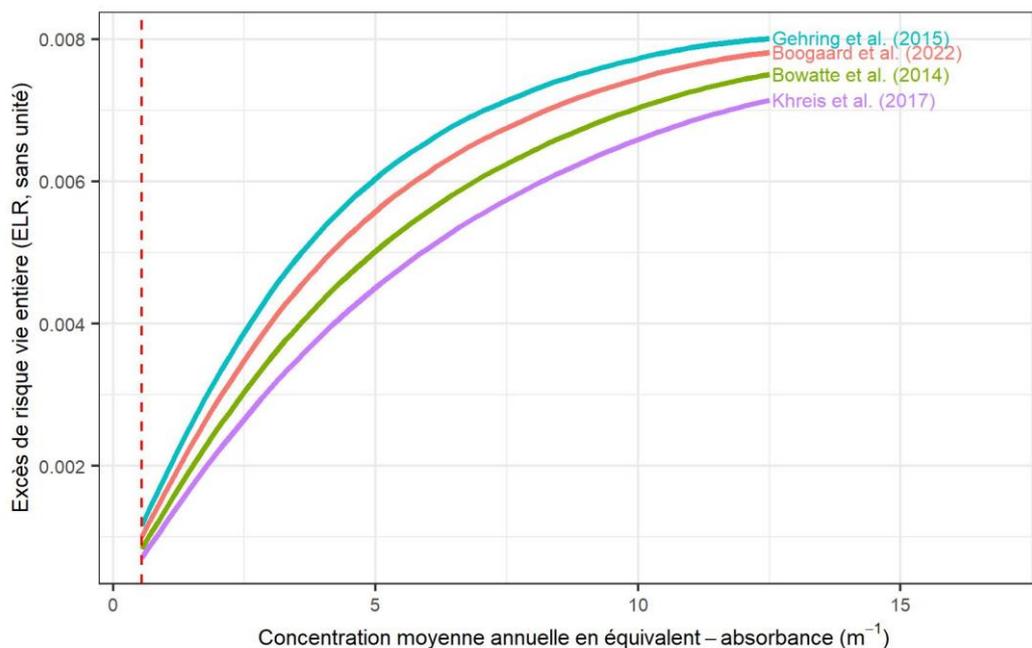
Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. *Abs* : absorbance ; *EC* : carbone élémentaire ; *MEDALL* : *mechanisms of the development of allergy project*.

**Figure 47. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de l'asthme chez l'enfant pour une augmentation de  $1.10^{-5} m^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

Les deux fonctions concentration-risque issues des analyses principales de Gehring *et al.* (2015) et de Khreis *et al.* (2017) ont été déterminées par le GT comme de niveau d'intérêt « fort » pour la dérivation d'une VTR (Figure 47). La fonction issue de l'analyse principale de l'étude de Bowatte *et al.* (2014) ainsi que celle issue de l'analyse secondaire de Boogaard *et al.* (2022) ont été déterminées comme de niveau d'intérêt « modéré », tandis que celle issue de l'analyse principale de Boogaard *et al.* (2022) a été déterminée comme de niveau d'intérêt « faible ». En effet, cette dernière a été estimée comme à risque de biais en raison de l'hétérogénéité des fenêtres d'exposition dans les études incluses.

Etant donné la tranche d'âge relativement jeune pour la survenue de l'asthme pédiatrique, l'approche par table de survie n'est pas requise et c'est donc l'approche dite simple qui a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet événement de santé.

Les valeurs de l'ELR pour l'incidence de l'asthme chez l'enfant obtenues à partir des quatre fonctions concentration-risque retenues à l'étape précédente sont présentées dans Figure 48.



**Figure 48. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) d'incidence de l'asthme chez l'enfant en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

L'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de l'étude de Gehring *et al.* (2015) est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. Cette fonction concentration-risque ayant été observée au sein de cohortes uniquement européennes, l'ELR obtenu est considéré transposable à la population française. Cette étude est jugée comme de bonne qualité par le GT en raison de l'effectif important de la population étudiée, de la standardisation des données de santé et d'exposition, de la prise en compte de nombreux facteurs de confusion ainsi que de la cohérence des résultats dans l'analyse de sensibilité incluant les enfants âgés de plus de 4 ans.

**Ainsi, compte tenu de ces éléments, l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Gehring *et al.* (2015) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : incidence de l'asthme chez l'enfant. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 49.**

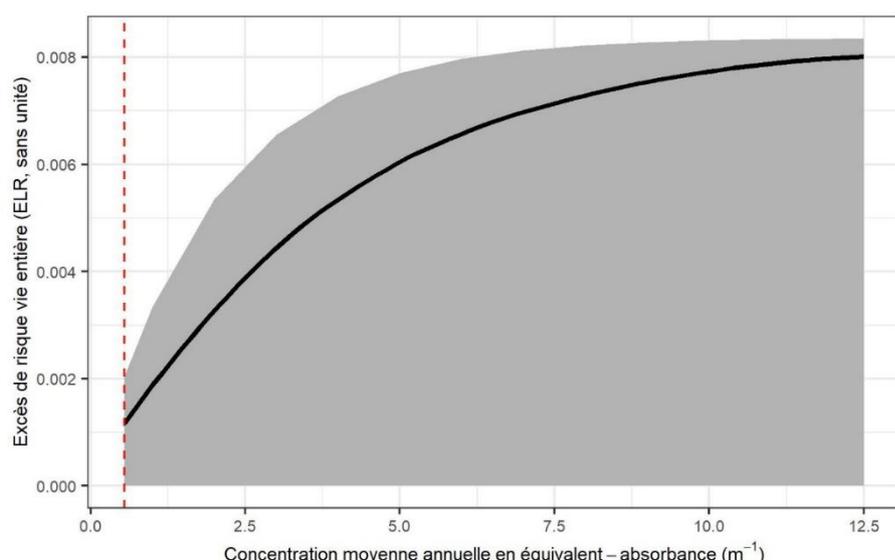


Figure 49. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) d'incidence de l'asthme chez l'enfant en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Gehring *et al.* (2015)

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

### Incidence de la BPCO

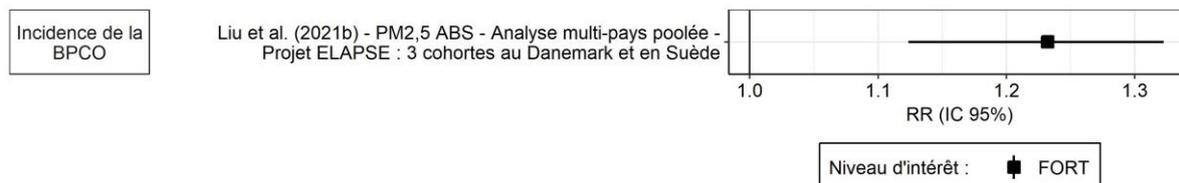
Une seule publication, décrite de manière synthétique dans le Tableau 37, a été identifiée sur l'exposition à long terme au « carbone suie » et l'incidence de la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) (Liu *et al.* 2021b).

Tableau 37. Description synthétique de la publication identifiée pour l'incidence de la BPCO et l'exposition à long terme au « carbone suie »

Publication	Type d'analyse et description
Incidence de la BPCO (Liu <i>et al.</i> 2021b)	Analyse multi-pays poolée Nombre d'études incluses : 3 études de cohortes européennes au sein du projet ELAPSE. Population large (n=98 508 participants dont 4 928 cas). Deux pays du nord de l'Europe uniquement (Danemark et Suède) donc populations exposées à des niveaux de concentrations faibles (moyenne ± écart-type : $1,17 \pm 0,41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ). Standardisation des données (exposition et événement de santé), forme de la relation disponible pour l'analyse principale <i>via</i> l'utilisation de splines. Les analyses secondaires aux plus faibles concentrations confirment les résultats de l'analyse principale mais sans caractérisation de la forme de la relation. Cohérence globale des données de santé mais pas de précision sur la prise en compte ou non des bronchiectasies.

ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

Dans cette publication, sept fonctions concentration-risque ont été extraites. Celle issue de l'analyse considérée comme principale par les auteurs et/ou le GT est présentée dans la Figure 50. Les autres fonctions sont issues de résultats d'analyses secondaires réalisées dans des sous-groupes de concentrations ambiantes décroissantes. La liste complète est visible en Annexe 7.



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1 \cdot 10^{-5}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

Figure 50. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % d'incidence de la BPCO pour une augmentation de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance

L'estimation centrale du risque dans l'analyse principale de Liu *et al.* (2021b) est de 1,23 et l'association est statistiquement significative. La forme non linéaire de cette fonction concentration-risque est par ailleurs caractérisée *via* l'utilisation d'un modèle *spline*. Les analyses secondaires confirment le résultat principal, en montrant des estimations du même ordre de grandeur.

La fonction concentration-risque issue de l'analyse principale a été déterminée par le GT comme de niveau d'intérêt « fort » pour la dérivation d'une VTR (Figure 50). Les fonctions issues d'analyses secondaires ont été déterminées comme de niveau d'intérêt « modéré » ou « faible ».

**L'absence de données de fond assez cohérentes et précises pour calculer l'ELR a conduit le GT à ne pas dériver de valeur candidate à la VTR pour l'évènement de santé : incidence de la BPCO. Seules les étapes d'extraction et de qualification du niveau d'intérêt ont été réalisées pour cet évènement de santé.**

### ***Mortalité toutes causes respiratoires***

Six publications, décrites de manière synthétique dans le Tableau 38, examinent le lien entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et la mortalité toutes causes respiratoires (Boogaard *et al.* 2022; Hvidtfeldt *et al.* 2019; Nilsson Sommar *et al.* 2021; Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021; Yang *et al.* 2019).

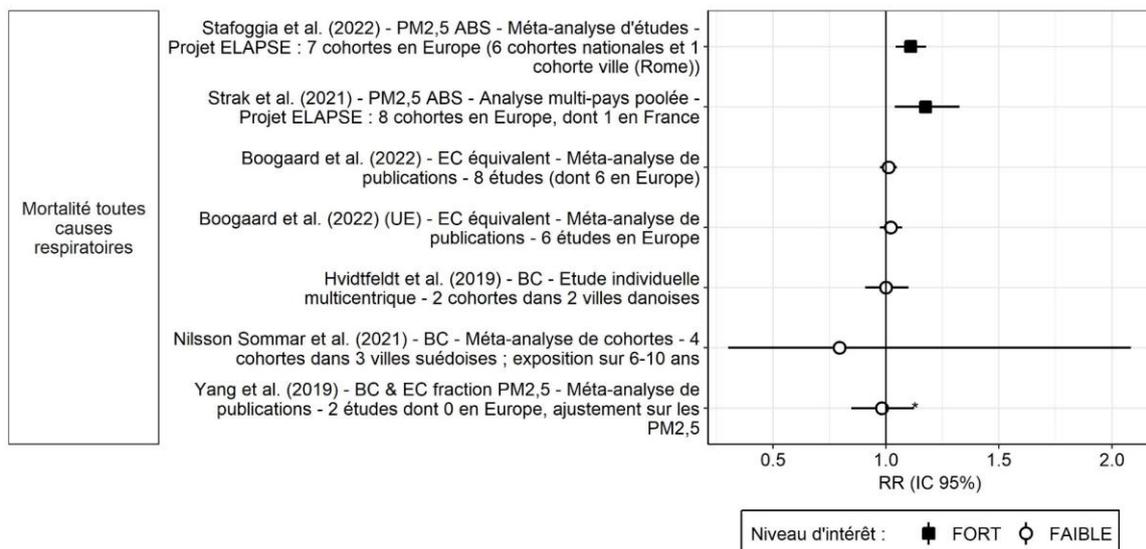
**Tableau 38. Description synthétique (par ordre alphabétique) des six publications identifiées pour la mortalité toutes causes respiratoires et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
<b>Mortalité toutes causes respiratoires</b>	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 8 études dont 6 européennes (incluant 1 étude du projet ESCAPE), identifiées grâce à une revue systématique de la littérature. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs. Les études d'intérêt examinent les métriques EC, BC, Abs et BS et une conversion en équivalent-EC a été effectuée par les auteurs avant la méta-analyse. Période de suivi mixte : quelques études <2010. Hétérogénéité considérée comme modérée ( $I^2 = 64\%$ ). Méta-risque faible et non significatif, 3 études (Pays-Bas, Angleterre, Hong Kong) ont un poids fort dans l'estimation du méta-risque (entre 18 % et 40 %).
	(Hvidtfeldt <i>et al.</i> 2019)	Etude multicentrique Etude individuelle multicentrique incluant deux villes danoises. Population large (n=49 564). Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Suivi long de 1979 à 2015. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles. Intérêt particulier des auteurs pour le rôle du bruit comme facteur de confusion de l'association entre pollution atmosphérique et santé.
	(Nilsson Sommar <i>et al.</i> 2021)	Méta-analyse de cohortes Nombre d'études incluses : 4 études dans 3 villes suédoises. Population large (n=68 679). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à BC à l'adresse de résidence. Nombreux facteurs de confusion (individuels et contextuels) disponibles.
	(Stafoggia <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de cohortes Nombre d'études incluses : 7 études dans 7 pays européens, au sein du projet ELAPSE. Très forte hétérogénéité entre les études pour cet évènement de santé ( $I^2 = 92,5\%$ ). Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition à Abs à l'adresse de résidence, bonnes performances. Données de registres utilisées donc population très large (n=28 153 138). Gros effort de standardisation des données entre pays.
	(Strak <i>et al.</i> 2021)	Analyse multi-pays poolée Nombre d'études incluses : 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE, dont 1 cohorte française (cohorte E3N). Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en ABS et risque dans l'analyse principale. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Résolution spatiale et temporelle fine du modèle d'estimation de l'exposition, bonnes performances (diminution attendue du risque de biais de classification).

Publication	Type d'analyse et description
(Yang <i>et al.</i> 2019)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 2 études identifiées grâce à une revue de la littérature. Seuls les résultats incluant un ajustement sur la masse totale des PM <sub>2,5</sub> ont été inclus par les auteurs dans la méta-analyse. Les études examinent les métriques EC et BC ; les auteurs n'ont pas appliqué de conversion. Hétérogénéité entre les études non rapportée.

ABS : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; E3N : Etude Epidémiologique auprès de femmes de la MGEN ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe ; ESCAPE : European Study of Cohorts for Air Pollution Effects.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard

Au sein de ces publications, 18 fonctions concentration-risque ont été extraites. Les sept fonctions issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT sont présentées dans la Figure 51 ; la liste complète est visible en Annexe 7. Deux estimations centrales du risque sont supérieures à 1 montrant des associations statistiquement significatives (Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021). Seule l'étude de Strak *et al.* (2021) a caractérisé la forme non linéaire de la relation entre la concentration en absorbance et le risque de mortalité toutes causes respiratoires en exploitant la classe de modèles SCHIF (*shape constrained health impact function*).



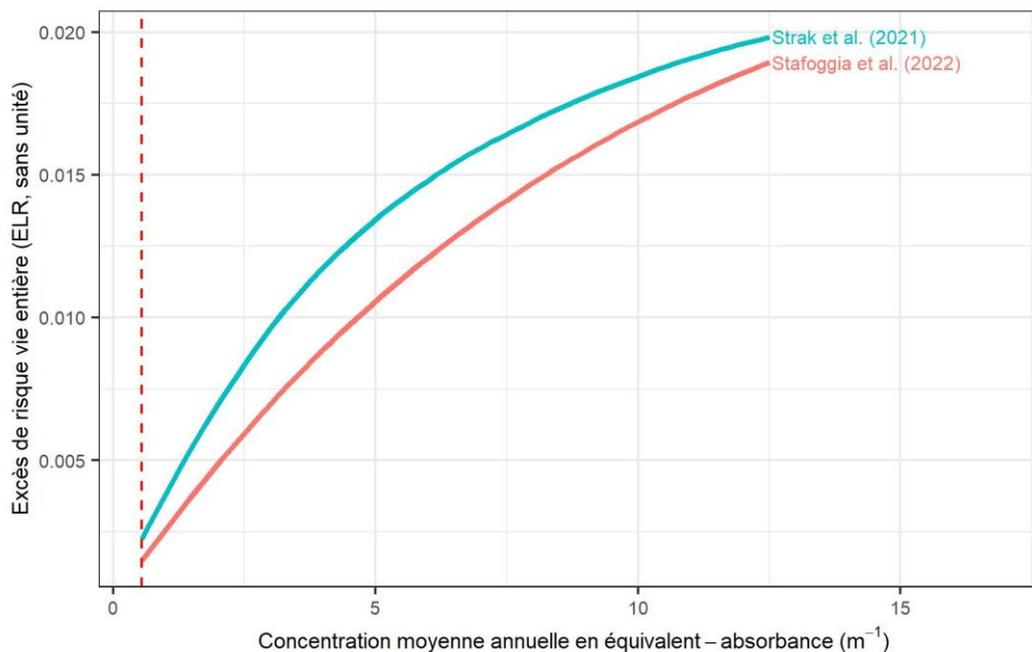
Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. \* Les risques n'ont pas pu être convertis en équivalent-abs car un mélange de métriques était utilisé par les auteurs, sans possibilité de transformation ; le risque est alors exprimé pour un incrément de  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; BS : fumées noires ; EC : carbone élémentaire ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

**Figure 51. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès pour causes respiratoires pour une augmentation de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance**

Parmi les fonctions concentration-risque extraites, 2 fonctions ont été déterminées par le GT comme de niveau d'intérêt « fort » pour la dérivation d'une VTR, tandis que les autres fonctions ont été déterminées comme de niveau d'intérêt « faible » en raison notamment du méta-risque faible ou inférieur à 1 et l'association non statistiquement significative.

**Au regard des données disponibles pour l'exposition à long terme au « carbone suie » et la mortalité toutes causes respiratoires, le GT a retenu 2 fonctions concentration-risque avec un niveau d'intérêt suffisant (*a minima* « modéré ») pour dériver une valeur candidate à la VTR.** Elles sont issues de 2 publications (Stafoggia *et al.* 2022; Strak *et al.* 2021)

Les données sur le risque de fond par classe d'âge sont disponibles pour la mortalité toutes causes respiratoires. Ainsi, l'approche par table de survie décrementale a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet évènement de santé. Les valeurs de l'ELR pour la mortalité toutes causes respiratoires obtenues à partir des deux fonctions concentration-risque retenues à l'étape précédente sont présentées dans la Figure 52.



**Figure 52. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité toutes causes respiratoires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

L'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de l'étude de Strak *et al.* (2021) est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. La forme non linéaire de la relation entre l'exposition à long terme au « carbone suie » et le risque de mortalité toutes causes respiratoires y est incluse. Cette analyse présente l'avantage de ne considérer que des cohortes européennes, permettant la bonne transposabilité de la fonction concentration-risque à la population française. Enfin, cette analyse est considérée de bonne qualité par les experts du GT grâce à la standardisation des données individuelles entre les cohortes, les degrés d'ajustement sur les facteurs de confusion et la modélisation sophistiquée de l'exposition (résolution spatiale et temporelle fine et bonnes performances).

**Ainsi, compte tenu de ces éléments, l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité toutes causes respiratoires. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 53.**

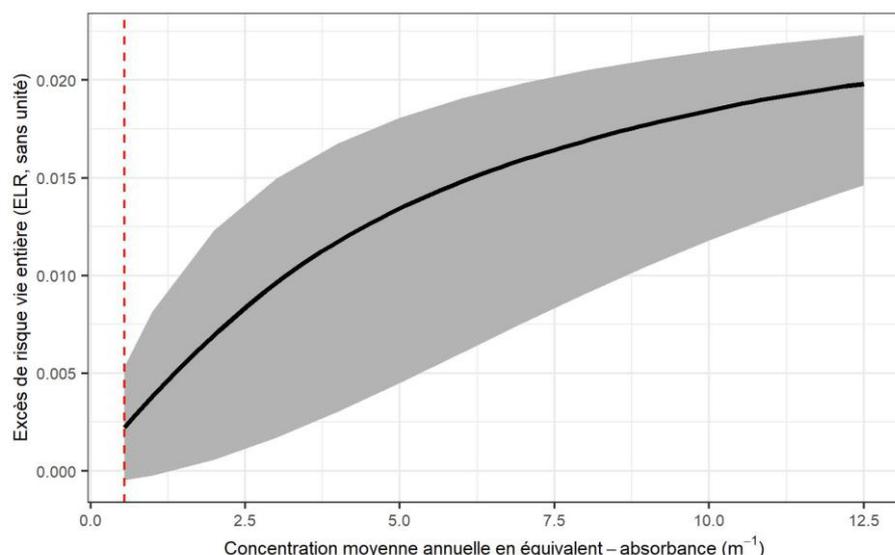


Figure 53. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité toutes causes respiratoires en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021)

En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.

### Mortalité de cause BPCO

Une seule publication, décrite de manière synthétique dans le Tableau 39, a été identifiée sur l'exposition à long terme au « carbone suie » et la mortalité par bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) (Strak *et al.* 2021).

Tableau 39. Description synthétique de la publication identifiée pour la mortalité de cause BPCO et l'exposition à long terme au « carbone suie »

	Publication	Type d'analyse et description
Mortalité de cause BPCO	(Strak <i>et al.</i> 2021)	Analyse multi-pays poolée Nombre d'études incluses : 8 cohortes européennes au sein du projet ELAPSE, dont 1 cohorte française (cohorte E3N). Standardisation des données de santé et d'exposition. Caractérisation de la forme (non linéaire) de la relation entre concentration en Abs et risque. Les populations des cohortes incluses sont exposées à des niveaux de concentrations ambiantes faibles ( $<3.10^{-5} m^{-1}$ ). Résolutions spatiale et temporelle fines du modèle d'estimation de l'exposition, bonnes performances (diminution attendue du risque de biais de classification).

Abs : absorbance ; E3N : Etude Epidémiologique auprès de femmes de la MGEN ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

Dans cette publication, une seule fonction concentration-risque a été extraite (Figure 54). L'estimation centrale du risque est de 1,25 et l'association est statistiquement significative. La forme non linéaire de la relation entre la concentration en absorbance et le risque de mortalité par BPCO est caractérisée en exploitant la classe de modèles SCHIF (*shape constrained health impact function*).



Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$ ) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; ELAPSE : Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe.

Figure 54. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de décès pour cause BPCO pour une augmentation de  $1.10^{-5} m^{-1}$  de l'exposition à long terme en équivalent-absorbance

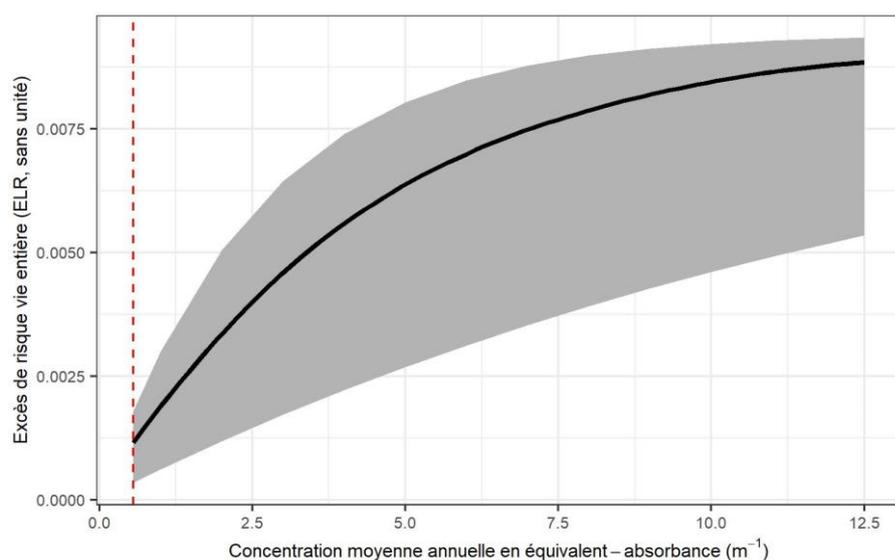
Le GT a déterminé cette fonction concentration-risque comme de niveau d'intérêt « fort » pour la dérivation d'une VTR. Au regard de cette unique donnée disponible pour l'exposition à long

terme au « carbone suie » et la mortalité par BPCO, le GT a retenu cette fonction concentration-risque pour la suite de la démarche.

Les données sur le risque de fond par classe d'âge sont disponibles pour la mortalité par BPCO. Ainsi, l'approche par table de survie décrementale a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet évènement de santé.

L'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021) prend en compte la forme non linéaire de la relation entre concentration et risque. L'analyse de Strak *et al.* (2021) présente l'avantage de ne considérer que des cohortes européennes, permettant la bonne transposabilité de la fonction concentration-risque à la population française. Enfin, cette analyse est considérée de bonne qualité par les experts du GT.

**Ainsi, compte tenu de ces éléments, l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : mortalité par BPCO. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 55.**



**Figure 55. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) pour la mortalité de cause BPCO en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Strak *et al.* (2021)**

*En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.*

### Petit poids de naissance

Six publications, décrites de manière synthétique dans le Tableau 40, ont été identifiées sur l'exposition à long terme au « carbone suie » et la survenue d'un petit poids de naissance (Boogaard *et al.* 2022; Brauer *et al.* 2008; Gehring *et al.* 2014; Kingsley *et al.* 2017; Pedersen *et al.* 2013; Sun *et al.* 2016). Certaines de ces publications ont été incluses par le biais de la revue de la littérature de Tsoli, Ploubidis et Kalantzi (2019) identifiée dans les requêtes bibliographiques (Brauer *et al.* 2008; Gehring *et al.* 2014; Kingsley *et al.* 2017; Sun *et al.* 2016).

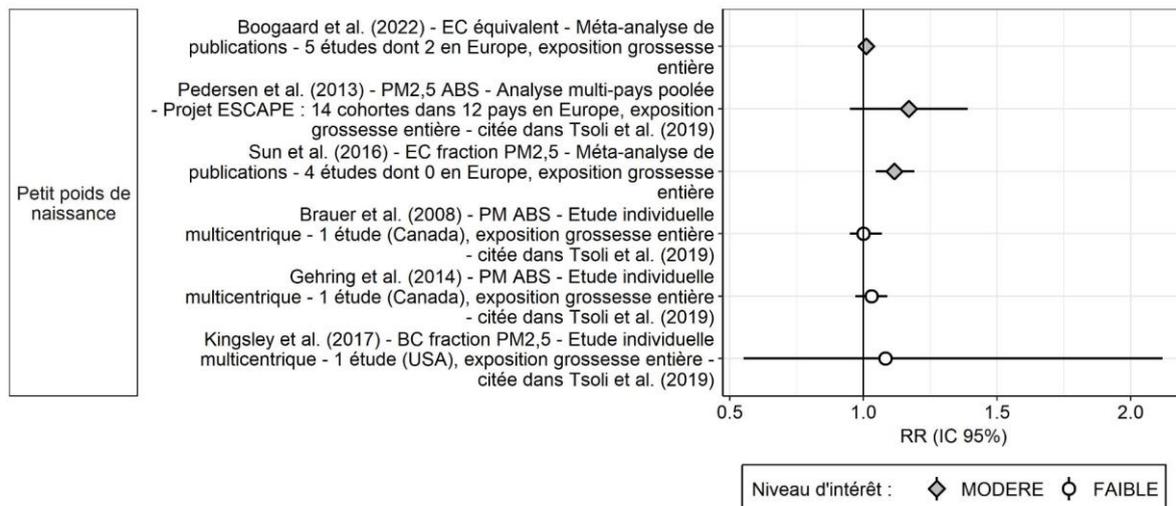
**Tableau 40. Description synthétique (par ordre alphabétique) des six publications identifiées pour le petit poids de naissance et l'exposition à long terme au « carbone suie »**

	Publication	Type d'analyse et description
Petit poids de naissance	(Boogaard <i>et al.</i> 2022)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 5 études dont 2 en Europe (incluant celle de Pedersen <i>et al.</i> 2013), identifiées grâce à une revue de la littérature. Une description de la qualité et des risques de biais des études a été faite par les auteurs, ainsi qu'une évaluation du poids de la preuve (confiance modérée dans la présence d'une association). Les 2 études européennes montrent des estimations de risques supérieures aux autres et des risques de biais moindres. Méta-risque faible et non significatif, hétérogénéité faible ( $I^2 = 12\%$ ). Différentes métriques selon les études et les auteurs ont transformé les résultats en équivalent EC avant la méta-analyse.
	(Brauer <i>et al.</i> 2008)	Etude multicentrique Etude de cohorte au Canada, une seule ville. Evènement considéré : petit poids de naissance à terme. Fenêtre d'exposition : moyenne durant la grossesse entière (modèle d'occupation des sols avec une résolution fine mais des performances médiocres).
	(Gehring <i>et al.</i> 2014)	Etude multicentrique Etude de cohorte individuelle au Canada (région de Vancouver). Utilisation d'une base de données administratives sur les naissances 1999-2002. Petit poids de naissance à terme et exposition moyenne grossesse entière. Estimation de l'exposition par modèles d'occupation des sols mais pas d'information sur les performances. Pas d'association mise en évidence et conclusion inchangée après ajustement sur le bruit.
	(Kingsley <i>et al.</i> 2017)	Etude multicentrique Etude de cohorte individuelle aux Etats-Unis ( <i>Rhode Island</i> ). Période de suivi : 2002-2012. Fenêtre d'exposition : grossesse entière. Les concentrations en « carbone suie » ont été modélisés à l'adresse de résidence avec un modèle d'occupation des sols ( <i>land-use regression</i> ). Résultat proche du nul. L'évènement considéré est le petit poids de naissance brut (avec un ajustement sur âge gestationnel dans le modèle), ce qui est difficilement comparable aux autres études (qui ne considèrent que les naissances à terme).
	(Pedersen <i>et al.</i> 2013)	Analyse multi-pays poolée Nombre d'études incluses : 14 cohortes européennes dans 12 pays au sein du projet ESCAPE, large population ( $n=74\ 178$ ), prise en compte de plusieurs facteurs d'ajustement dans le modèle. Evaluation standardisée de l'exposition (concentrations annuelles en Abs) selon modèle d'occupation des sols ( <i>land-use regression</i> ), avec de bonnes performances. Standardisation de la définition de l'évènement de santé entre cohortes : petit poids de naissance à terme. Fenêtre d'exposition : grossesse entière. Méta-risque supérieur à 1 mais association non statistiquement significative.
	(Sun <i>et al.</i> 2016)	Méta-analyse de publications Nombre d'études incluses : 4 études de cohorte, pas de localisations européennes. Fenêtre d'exposition : grossesse entière. Métrique d'exposition : EC uniquement. Evènement considéré : petit poids de naissance à terme. Pas d'évaluation de la qualité des publications. Hétérogénéité faible entre les études ( $I^2 = 25\%$ ).

Abs : absorbance ; EC : carbone élémentaire ; ESCAPE : European Study of Cohorts for Air Pollution Effects.  $I^2$  est une indication de la proportion de la variabilité attribuée à l'hétérogénéité entre les études incluses dans une méta-analyse et non au hasard.

Au sein de ces publications, six fonctions concentration-risque issues de résultats considérés comme principaux par les auteurs et/ou le GT ont été extraites (Figure 56). Les estimations centrales de risque issues de ces résultats sont toutes supérieures à 1, avec des valeurs comprises entre 1,00 et 1,17, bien que seule l'association de Sun *et al.* (2016) soit statistiquement significative. La caractérisation de la forme non linéaire de la relation entre la

concentration en « carbone suie » et le petit poids de naissance n'est disponible dans aucune de ces études.



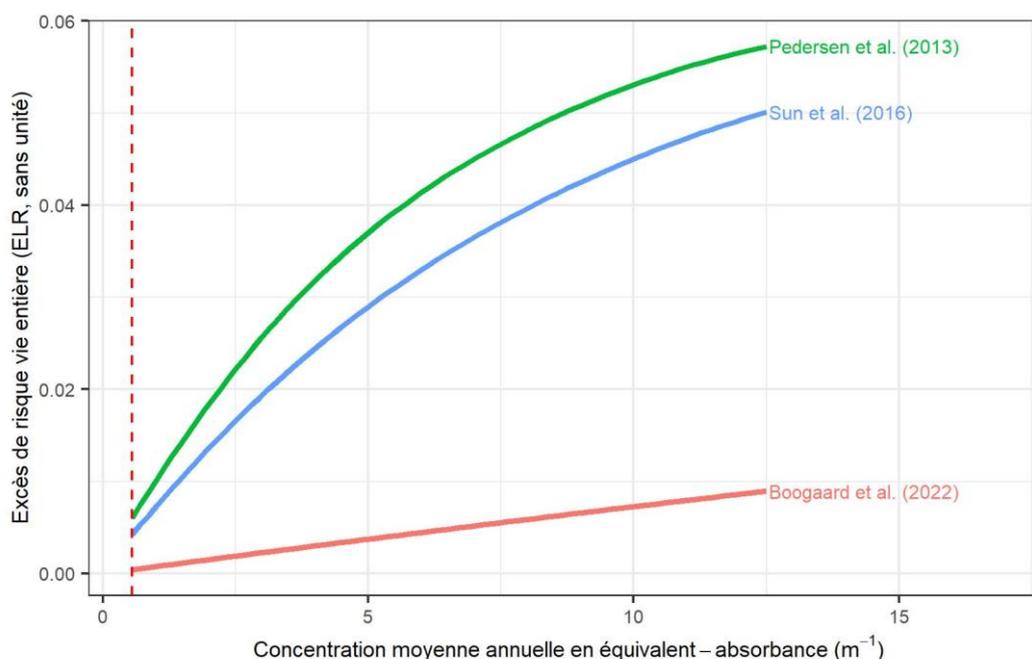
Une standardisation pour un incrément d'une unité de concentration ( $1.10^{-5}$  si absorbance ou équivalent-abs) a été appliquée afin de permettre les comparaisons. Abs : absorbance ; BC : carbone suie ; EC : carbone élémentaire ; ESCAPE : European Study of Cohorts for Air Pollution Effects.

**Figure 56. Risque relatif (RR) et intervalle de confiance (IC) à 95 % de petit poids de naissance pour une augmentation de  $1.10^{-5} \text{ m}^{-3}$  de l'exposition à long terme (gestationnelle) en équivalent-absorbance**

Parmi les fonctions concentration-risque extraites, trois fonctions ont été déterminées comme de niveau d'intérêt « modérée » pour la dérivation d'une VTR (Figure 56) : celle de Pedersen *et al.* (notamment en raison de sa population d'étude strictement Européenne et de la standardisation des données de santé et d'exposition opérée entre les cohortes), celle de Boogaard *et al.* (notamment en raison de l'application d'un processus de revue systématique incluant une description de la qualité et des risques de biais) et celle de Sun *et al.* (notamment en raison de la précision de l'intervalle de confiance et de la significativité statistique de l'association). Les fonctions restantes ont été déterminées comme de niveau d'intérêt « faible », en raison de l'absence de localisations européennes, d'une faible magnitude de risque et/ou d'un manque de significativité statistique.

**Au regard des données disponibles pour l'exposition à long terme au « carbone suie » et la survenue d'un petit poids de naissance, le GT a retenu 3 fonctions concentration-risque avec un niveau d'intérêt suffisant (a minima « modéré ») pour dériver une VTR. Elles sont issues de trois publications (Boogaard *et al.* 2022; Pedersen *et al.* 2013; Sun *et al.* 2016).**

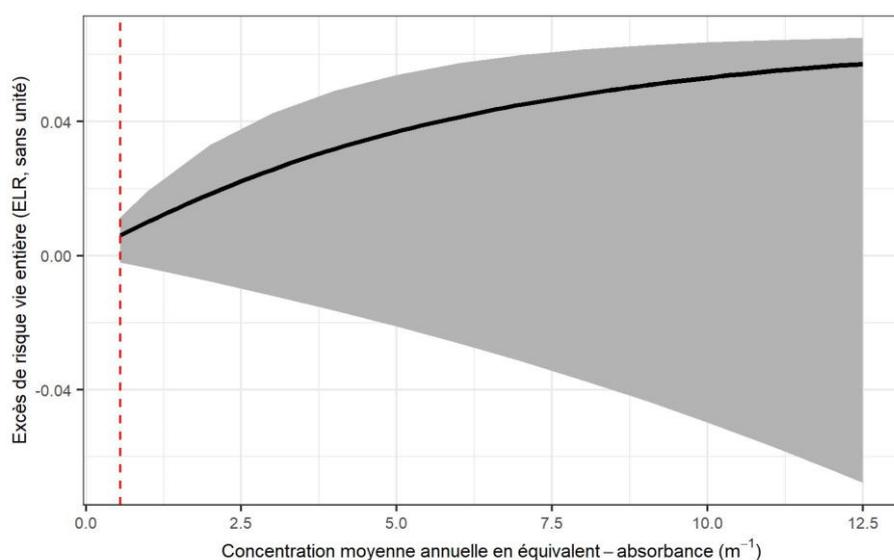
Etant donné la tranche d'âge relativement jeune pour la survenue d'un petit poids de naissance, l'approche par table de survie n'est pas requise et c'est donc l'approche dite simple qui a été utilisée pour calculer l'excès de risque vie entière (ELR) pour cet évènement de santé. Les valeurs de l'ELR pour le petit poids de naissance obtenues à partir des trois fonctions concentration-risque retenues à l'étape précédente sont présentées dans la Figure 57.



**Figure 57. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale) pour la mortalité de cause cardiopathie ischémique de petit poids de naissance en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie » exprimées en équivalent-absorbance**

L'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de l'étude de Pedersen *et al.* (2013) est le plus protecteur pour la santé sur l'ensemble de la gamme de concentration considérée. Cette étude présente l'avantage de ne considérer que des cohortes européennes, permettant la bonne transposabilité de la fonction concentration-risque à la population française. Cette étude est par ailleurs jugée de bonne qualité par le GT en raison du très large effectif de la population étudiée, la robustesse des ajustements réalisés dans les analyses ainsi que la standardisation des données d'exposition et de santé.

**Ainsi, compte tenu de ces éléments, l'ELR dérivé de la fonction concentration-risque de Pedersen *et al.* (2013) a été sélectionné pour la dérivation de la VTR candidate pour l'évènement de santé : petit poids de naissance. L'ELR et son intervalle de confiance à 95 % sont représentés en Figure 58.**



**Figure 58. Excès de risque vie entière (ELR, estimation centrale et intervalle de confiance) de petit poids de naissance en fonction des niveaux de concentrations en « carbone suie », issue de la fonction concentration-risque de Pedersen *et al.* (2013)**

*En noir : estimation centrale. En gris : intervalle de confiance.*

## Synthèse

Tableau 41. Description synthétique des données utilisées pour dériver les valeurs candidates à la VTR long terme pour le « carbone suie »

Evènement de santé	N références identifiées	N fonctions concentration-risque extraites	Référence de la fonction concentration-risque retenue pour la construction de l'ELR	Approche utilisée pour la construction de l'ELR	Source des données de santé (correspondant au risque de fond) utilisées pour la construction de l'ELR
<b>Mortalité toutes causes</b>					
Mortalité toutes causes non accidentelles	8	23	Strak <i>et al.</i> (2021)	Table de survie décrémente	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
<b>Santé cardiovasculaire</b>					
Incidence d'AVC	3	10	Wolf <i>et al.</i> (2021)	Table de survie décrémente	• Données PMSI (ATIH) exploitées par Santé Publique France (DREES et Santé Publique France 2017) : taux de patients hospitalisés France entière (hors Mayotte), 2014 • Données du registre des AVC de Lille (Gauthier <i>et al.</i> 2020) : taux de létalité par type d'AVC, standardisés sur l'âge de la population française de 2011, France, 2008-2017
Incidence d'évènements cardiopathies ischémiques	1	2	Aucune fonction retenue car niveau d'intérêt insuffisant	s.o	s.o
Incidence d'évènements coronariens aigus	1	8	Aucune fonction retenue en raison de l'indisponibilité de données cohérentes pour calculer l'ELR	s.o	s.o
Incidence d'infarctus du myocarde	1	1	Aucune fonction retenue en raison de l'indisponibilité de données cohérentes pour calculer l'ELR	s.o	s.o
Mortalité toutes causes cardiovasculaires	7	21	Yang <i>et al.</i> (2021)	Table de survie décrémente	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
Mortalité par cardiopathie ischémique	2	3	Strak <i>et al.</i> (2021)	Table de survie décrémente	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
Mortalité pour causes cérébrovasculaires	1	1	Aucune fonction retenue car le GT a privilégié la prise en compte de l'incidence de l'AVC d'une part et de la mortalité pour causes cardiovasculaires d'autre part	s.o	s.o
<b>Santé respiratoire</b>					
Incidence de l'asthme chez l'adulte	2	8	Liu <i>et al.</i> (2021a)	Table de survie décrémente	Données <i>Global Health Data Exchange</i> : taux d'incidence France 2015-2019
Incidence de l'asthme chez l'enfant	4	5	Gehring <i>et al.</i> (2015)	Simple décrémente	Données <i>Global Health Data Exchange</i> : taux d'incidence France, 2015-2019, moins de 19 ans
Incidence de la BPCO	1	7	Aucune fonction retenue en raison de l'absence de donnée de fond pour calculer l'ELR	s.o	s.o

Evènement de santé	N références identifiées	N fonctions concentration-risque extraites	Référence de la fonction concentration-risque retenue pour la construction de l'ELR	Approche utilisée pour la construction de l'ELR	Source des données de santé (correspondant au risque de fond) utilisées pour la construction de l'ELR
Mortalité toutes causes respiratoires	6	18	Strak <i>et al.</i> (2021)	Table de survie décrémente	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
Mortalité par BPCO	1	1	Strak <i>et al.</i> (2021)	Table de survie décrémente	Données CépiDC : taux de mortalité France entière (hors Mayotte et COM), 2011-2015
<b>Santé périnatale</b>					
Petit poids de naissance (<2500g)	6	6	Pedersen <i>et al.</i> (2013)	Simple décrémente	Données PMSI-MCO (ATIH) exploitées par la DREES (DREES et Santé Publique France 2017) : taux de naissances avec un petit poids de naissance (<2 500 g), naissances vivantes à terme non gémeillaires et non multiples, domiciliées France entière (incluant les naissances au domicile si transfert vers un établissement), 2014

ATIH : Agence technique de l'information sur l'hospitalisation ; AVC : accident vasculaire cérébral ; BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive ; COM : collectivités d'Outre-mer ; DREES : Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques ; ELR : excès de risque vie entière (excess lifetime risk) ; PMSI-MCO : programme de médicalisation des systèmes d'information relative à l'activité de médecine, chirurgie, obstétrique et odontologie des établissements de santé ; s.o : sans objet.

## Annexe 9 : Niveaux de confiance dans les valeurs candidates à la VTR long terme pour le carbone suie

### Guide de remplissage

Catégorie	Critère	Guide de remplissage pour les études observationnelles chez l'Homme
Corpus de données	Quantité et qualité	Jugement d'experts : 1 à 5. Se reporter au chapitre 3.
Hypothèse de construction	Sans seuil	Absence de seuil à l'échelle de la population : 4 ou 5 (jugement d'experts).
Choix de l'effet critique	Nature des effets	Prévalence : 1 ou 2 Mortalité : 3 ou 4 (jugement d'experts ; plutôt 4 quand cause spécifique et 3 quand mortalité toutes causes) Incidence : 5
	Convergence des études	Jugement d'experts : 1 à 5. Se reporter aux figures dans le Chapitre 7 et l'Annexe 8. <i>De manière complémentaire, dans le cas du carbone suie, la convergence pourra être évaluée en considérant les études examinant les PM en masse pour un même évènement de santé.</i>
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	Mécanisme inconnu : 3 Connaissance incomplète du mécanisme chez l'Homme : 4 Mécanisme connu chez l'Homme : 5 Jugement d'experts. Se reporter au chapitre 3.2 si besoin
	Transposabilité animal - Homme	La transposabilité animal-Homme n'est pas une source d'incertitude dans les présents travaux : 5
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	Jugement d'experts : 1 à 5. Se reporter au Chapitre 7 et aux Annexes 7 et 8.
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	Se reporter à l'évaluation du niveau d'intérêt de la fonction concentration-risque pour dériver une VTR : • Intérêt « modéré » : 3 • Intérêt « fort » : 5
Ajustements	Temporel	L'ajustement temporel n'est pas une source d'incertitude dans les présents travaux : 5
	Allométrique	L'ajustement allométrique n'est pas nécessaire dans les présents travaux : 5
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	Approche par table de survie : 4 ou 5 (4 si table de survie peu adaptée à l'effet) Approche dite simple : 3 ou 4 (par exemple : 4 si effet non impacté par la probabilité de survie au cours de la vie entière)

BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.

**Mortalité toutes causes non accidentelles**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	5	Nombreuses études de bonne qualité
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Mortalité toutes causes, évènement peu spécifique intégrant des évènements respiratoires et cardiovasculaires
Choix de l'effet critique	Nature des effets	3	Mortalité toutes causes, évènement peu spécifique
	Convergence des études	3	
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Evènement très large et mécanisme incomplètement connu, mais preuves toxicologiques montrent des effets respiratoires et cardiovasculaires (potentiellement incluent dans mortalité toutes causes)
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Strak <i>et al.</i> (2021)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	5	Niveau d'intérêt fort pour dériver une VTR, forme (non linéaire) de la relation disponible
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	5	Table de survie
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,6</b>	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.*

**Incidence d'AVC**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	3	Selon l'US EPA (2019), nombre limité d'études sur santé cardiovasculaire et résultats incohérents. Selon l'Anses (2019), indication « modérée » d'effets à long terme sur santé cardiovasculaire
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Moins de littérature pour étayer l'hypothèse de l'absence de seuil sur cet événement de santé
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Incidence
	Convergence des études	3	Etudes convergentes mais uniquement deux recensées
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Hypothèses sur inflammation, mais moins bien connues que pour les PM <sub>2,5</sub>
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	4	Wolf <i>et al.</i> (2021)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	3	Niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR, forme (non linéaire) de la relation disponible
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	5	Table de survie adaptée pour l'évènement incidence d'AVC avec prise en compte de la faible létalité associée à un type spécifique d'AVC
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,1</b>	

AVC : accident vasculaire cérébral ; BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.

**Mortalité toutes causes cardiovasculaires**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	3	Moins d'études pour le « carbone suie » que pour les PM <sub>2,5</sub> en masse. Plausibilité du lien de causalité pour le « carbone suie » considérée modérée par le GT.
Hypothèse de construction	Sans seuil	5	Absence de seuil observée en études épidémiologiques
Choix de l'effet critique	Nature des effets	3	Mortalité de cause spécifique, mais catégorie encore très large et hétérogène
	Convergence des études	4	Résultats tous positifs, très cohérents avec l'ensemble des événements inclus dans la catégorie santé cardiovasculaire, mais grande représentation du projet ELAPSE.
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	5	Beaucoup de littérature sur effets infraclinique cardiovasculaires des PM en masse, marqueurs de la santé cardiovasculaire (menant potentiellement au décès). Preuves toxicologiques existantes et voies mécanistiques bien documentées.
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	4	Yang <i>et al.</i> (2021)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	5	Niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR, forme (non linéaire) de la relation disponible mais non monotone
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	5	Table de survie
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,2</b>	

BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; ELAPSE : Effects of Low-level Air Pollution : a Study in Europe ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.

**Mortalité liée à une cardiopathie ischémique**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	4	
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Moins de littérature pour étayer l'hypothèse de l'absence de seuil sur cet événement de santé
Choix de l'effet critique	Nature des effets	4	Mortalité de cause spécifique
	Convergence des études	2	Une seule étude identifiée mais très large population (8 cohortes en Europe)
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Preuves toxicologiques disponibles mais mécanisme incomplètement connu
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Strak <i>et al.</i> (2021)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	5	Niveau d'intérêt fort pour dériver une VTR, forme (non linéaire) de la relation disponible
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	5	Table de survie
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,4</b>	

BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.

**Incidence de l'asthme chez l'adulte**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	3	Plausibilité du lien de causalité considérée modérée par le GT. Peu d'études dans la littérature avec des résultats divergents
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Moins de littérature pour étayer l'hypothèse de l'absence de seuil sur cet évènement de santé
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Incidence
	Convergence des études	3	Seulement deux études recensées dans les présents travaux
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	3	
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	4	Liu <i>et al.</i> (2021a)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	3	Niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	4	
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>3,9</b>	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.*

**Incidence de l'asthme chez l'enfant**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	4	Niveau de plausibilité du lien de causalité considéré « modéré » par le GT
Hypothèse de construction	Sans seuil	5	Absence de seuil observée en études épidémiologiques
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Incidence
	Convergence des études	4	Toutes les études identifiées mettent en évidence des associations positives
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	3	
	Transposabilité animal - Homme	5	Non nécessaire
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Gehring <i>et al.</i> (2015)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	5	Niveau d'intérêt fort pour dériver une VTR
Ajustements	Temporel	5	Non nécessaire
	Allométrique	5	Non nécessaire
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	4	Approche dite simple
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,6</b>	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.*

**Mortalité toutes causes respiratoires**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	3	Plausibilité moins bien établie pour la mortalité que pour la morbidité, niveau de preuve « modéré » selon l'Anses (2019)
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Moins de littérature pour étayer l'hypothèse de l'absence de seuil sur cet événement de santé
Choix de l'effet critique	Nature des effets	3	Catégorie large et hétérogène d'effets
	Convergence des études	3	Nombre d'études limité (deux mettent en évidence une association claire) avec des métriques différentes
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Mécanisme d'action connu pour pathologies respiratoires (qui mènent potentiellement au décès) et PM <sub>2,5</sub> - moins connu pour la fraction carbonée
	Transposabilité animal - Homme	5	
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Strak <i>et al.</i> (2021)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	5	Niveau d'intérêt fort pour dériver une VTR, forme (non linéaire) de la relation disponible
Ajustements	Temporel	5	
	Allométrique	5	
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	5	
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,3</b>	

BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.

**Mortalité de cause bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO)**

Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	3	Niveau de preuve « inadéquat » selon l'Anses (2019)
Hypothèse de construction	Sans seuil	4	Moins de littérature pour étayer l'hypothèse de l'absence de seuil sur cet événement de santé, malgré sa spécificité
Choix de l'effet critique	Nature des effets	4	Mortalité de cause spécifique
	Convergence des études	1	Une seule étude identifiée donc convergence difficile à estimer
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Mécanisme pour incidence de la BPCO et PM en masse assez bien documenté, moins évident pour la mortalité tout de même.
	Transposabilité animal - Homme	5	
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Strak <i>et al.</i> (2021)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	5	Niveau d'intérêt fort pour dériver une VTR, forme (non linéaire) de la relation disponible
Ajustements	Temporel	5	
	Allométrique	5	
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	5	Table de survie
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,3</b>	

BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.

**Petit poids de naissance**

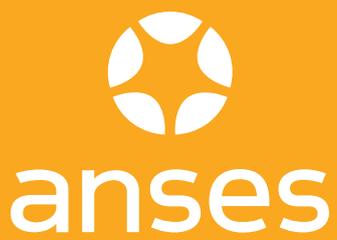
Catégorie	Critère	Niveau de confiance	Argumentation
Corpus de données	Quantité et qualité	3	Plausibilité de causalité considérée « modérée » par le GT
Hypothèse de construction	Sans seuil	5	Absence de seuil observée en études épidémiologiques
Choix de l'effet critique	Nature des effets	5	Petit poids de naissance assimilé à de l'incidence
	Convergence des études	3	Globalement, les études montrent des associations positives même si de faibles amplitudes et n'atteignant pas toujours la significativité statistique.
	Mécanisme d'action (chez l'animal et chez l'Homme)	4	Hypothèses fortes sur le mécanisme reliant le petit poids de naissance et les PM en masse.
	Transposabilité animal - Homme	5	
Choix de l'étude (ou des études) clé	Qualité	5	Pedersen <i>et al.</i> (2013)
Choix de la dose critique	BMD/BMDL, NOAEL/LOAEL, NOAEL seul ou LOAEL seul; fonction concentration-risque	3	Niveau d'intérêt modéré pour dériver une VTR
Ajustements	Temporel	5	
	Allométrique	5	
Méthode de calcul de l'excès de risque	Approche dite simple vs. approche par table de survie	4	Approche dite simple
<b>Niveau de confiance global</b>		<b>4,2</b>	

*BMD : Benchmark Dose ; BMDL : limite inférieure de l'intervalle de confiance de la benchmark dose ; NOAEL : No Observed Adverse Effect Level ; LOAEL : Lowest Observed Adverse Effect Level.*

## Notes

---





AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE  
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex  
[www.anses.fr](http://www.anses.fr) — [@Anses\\_fr](https://twitter.com/Anses_fr)